

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Nikola Kveštak

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof.dr.sc. Branko Bauer

Student:

Nikola Kveštak

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, primjenom znanja stečenog na Fakultetu strojarstva i brodogradnje uz korištenje navedene literature. Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru na stručnom vodstvu i savjetima pri pisanju ovog rada. Zahvaljujem i djelatnicima Laboratorija za ljevarstvo na savjetima, komentarima i pomoći pri izradi eksperimenta.

Nikola Kveštak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nikola Kveštak** Mat. br.: 0035172718

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Napajanje odljevka od aluminijske legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Risering of aluminium alloy casting**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti napajanje odljevaka, uključujući pravila i mehanizme napajanja. Na zadanom odljevku potrebno je primijeniti pravila napajanja i konstruirati CAD model sa sustavom ulijevanja i nekoliko varijanti sustava napajanja. Napraviti simulaciju u programskom paketu QuikCAST. Analizirati i optimirati sustav napajanja.

Zadatak zadan:

12. ožujka 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Rok predaje rada:

14. svibnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

20., 21. i 22. svibnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O TEHNOLOGIJI LIJEVNJA.....	2
2.1. Podjela postupka lijevanja.....	6
2.1.1. Osnovna obilježja kalupa.....	7
2.1.2. Lijevanje u jednokratne kalupe.....	8
2.1.3. Lijevanje u stalne kalupe.....	10
3. ULJEVNI SUSTAV.....	11
3.1. Dijelovi uljevnog sustava.....	13
3.1.1. Uljevna čaša.....	14
3.1.2. Spust.....	15
3.1.3. Razvodnik.....	16
3.1.4. Ušće.....	17
3.2. Vrste uljevnih sustava.....	18
3.3. Dimenzioniranje uljevnih sustava.....	20
3.3.1. Primjena Bernoullijevog zakona.....	21
3.3.2. Primjena zakona o kontinuitetu strujanja.....	21
3.3.3. Učinci momenta.....	22
3.3.4. Vrijeme lijevanja.....	23
3.3.5. Dimenzioniranje kritičnog presjeka.....	23

4. NAPAJANJE ODLJEVAKA.....	24
4.1. Prijenos topline i skrućivanja.....	24
4.2. Vrste i položaj pojila.....	30
4.3. Pravila napajanja.....	34
4.4. Mehanizmi napajanja.....	41
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	45
5.1. Simulacija ulijevnja i skrućivanja.....	46
5.1.1. Lijevanje sa vratom pojila dimenzija 15x15, 26x26, 35x35, i bez vrata...	46
5.2. Izrada kalupa za lijevanje.....	53
5.3. Lijevanje.....	56
5.4. Analiza rezultata.....	62
6. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66
PRILOZI.....	67

## POPIS SLIKA

Slika 1. Lijevanje metala u kalup.....	2
Slika 2. Blok motora BMW.....	4
Slika 3. Prikaz udjela odljevaka u pojedinim granama strojogradnje.....	5
Slika 4. Ovisnost cijene odljevka o veličini serije.....	6
Slika 5. Dvodijelni pješčani kalup.....	7
Slika 6. 3D prikaz jednog modela uljevnog sustava.....	8
Slika 7. Sabijanje pješčanog kalupa.....	9
Slika 8. Primjer ulijevanja litine u jednokratni pješčani kalup.....	9
Slika 9. Stalni kalup.....	10
Slika 10. Primjer ulijevanja litine u stalni kalup.....	11
Slika 11. Primjer uljevnog sustava sa svim potrebnim komponentama.....	13
Slika 12. Koritasta uljevna čaša.....	14
Slika 13. Ljevkasta uljevna čaša.....	14
Slika 14. Pravilno konstruiran spust.....	15
Slika 15. Podnožje spusta sa svim potrebnim dimenzijama.....	16
Slika 16. Mogući poprečni presjeci razvodnika.....	17
Slika 17. Mogući poprečni presjeci ušća.....	18
Slika 18. Direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo.....	19
Slika 19. Indirektni uljevni sustav preko razvodnika i pojila.....	19
Slika 20. Uljevni sustav sa ušćem odozdo.....	20
Slika 21. Grafički prikaz zakona o kontinuitetu strujanja različitim površinama poprečnog presjeka.....	22
Slika 22. Utjecaj sile na strujanje taljevine.....	22
Slika 23. Prijenos topline u kalupu.....	24
Slika 24. Prijenos topline unutar pijeska kalupa.....	25
Slika 25. Kalup ispunjen rastaljenim metalom.....	25
Slika 26. Primjer progresivnog skrućivanja.....	26
Slika 27. Primjer usmjerenog skrućivanja.....	26
Slika 28. Primjer usmjerenog skućivanja.....	26
Slika 29. Primjer progresivnog skrućivanja.....	27
Slika 30. Progresivno i usmjereno skrućivanje.....	27
Slika 31. Primjer skupljanja u tekućem staju i pri skrućivanju.....	28
Slika 32. Skupljanje u krutom stanju.....	28
Slika 33. Odljevak oblika slova T.....	30
Slika 34. Napajanje odljevka.....	31
Slika 35. Smještaj pojila.....	32
Slika 36. Pojilo ispred odljevka, ili toplo pojilo.....	33

Slika 37. Pojilo iza odljevka, ili hladno pojilo.....	33
Slika 38. Odljevak sa toplim i hladnim pojilom.....	34
Slika 39. Pravilo broj 1.....	35
Slika 40. Pravilo broj 2.....	36
Slika 41. Pravilo broj 3.....	37
Slika 42. Pravilo broj 4.....	38
Slika 43. Pravilo broj 5.....	39
Slika 44. Pravilo broj 6.....	40
Slika 45. Pravilo broj 7.....	41
Slika 46. Mehanizmi napajanja.....	42
Slika 47. CAD model odljevka.....	44
Slika 48. Dimenzije CAD modela odljevka.....	45
Slika 49. CAD model sa uljevnim sustavom.....	45
Slika 50. Histogram vrijeme do solidusa.....	50
Slika 51. Histogram toplinski moduli.....	50
Slika 52. Histogram vrijeme prestanka napajanja.....	51
Slika 53. Sabijanje kalupne mješavine i rotacija donjaka kalupa za 180°.....	52
Slika 54. Pozicioniranje modela sa uljevnim sustavom i nanošenje likapodija.....	52
Slika 55. Postavljanje gornjaka kalupa i punjenje modelnom kalupnom mješavinom.....	53
Slika 56. Punjenje gornjaka kalupa i sabijanje kalupne mješavine nakon dodavanja crne dopunske kalupne mješavine.....	53
Slika 57. Uklanjanje pojila koje u našem slučaju služi kao spust.....	54
Slika 58. Uklanjanje modela i vrata pojila.....	54
Slika 59. Zatvaranje kalupa.....	55
Slika 60. Gotovi kalupi sa različitim vratovima pojila.....	55
Slika 61. Zagrijavanje ljevačkog lonca i elektrootporne peći s taljevinom aluminija.....	56
Slika 62. Mjerenje temperature taljevine pirometrom.....	56
Slika 63. Uklanjanje nečistoća (oksida).....	57
Slika 64. Ulijevanje taljevine iz peći u ljevački lonac.....	57
Slika 65. Mjerenje temperature taljevine u ljevačkom loncu.....	58
Slika 66. Ulijevanje taljevine u kalup.....	58
Slika 67. Kalup i pojilo nakon skrućivanja odljevka.....	59
Slika 68. Rastresanje kalupa.....	59
Slika 69. Gotovi odljevci sa uljevnim sustavom.....	60
Slika 70. Gotovi odljevci sa odvojenim uljevnim sustavom.....	60
Slika 71. Radiogrami odljevaka: uzorak 1 vrat 15x15 mm, uzorak 2 vrat 26x26 mm, uzorak 3 vrat 35x35 mm.....	61
Slika 72. Poroznost uzorka 1.....	62
Slika 73. Uzorak 2 u presjeku.....	63



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prednosti i nedostaci tehnologije lijevanja.....	3
Tablica 2. Vremena do postizanja solidusa [s].....	46
Tablica 3. 2D prikazi poroznosti odljevaka [%].....	48
Tablica 4. Kretanje toplinskih modula [m].....	49

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
$V_{\check{c}}$	$[\text{dm}^3]$	Volumen čaše
$k$	-	Koeficijent ovisan o masi taljevine u kalupu
$P$	$[\text{kg}/\text{dm}^3]$	Gustoća taljevine
$m$	$[\text{kg}]$	Ukupna masa taljevine
$A_{\text{ps}}$	$[\text{mm}^2]$	Površina poprečnog presjeka podnožja spusta
$A_{\text{sd}}$	$[\text{mm}^2]$	Površina poprečnog presjeka spusta
$h_{\text{ps}}$	$[\text{mm}]$	Visina podnožja spusta
$h_v$	$[\text{mm}]$	Visina razvodnika
$h$	$[\text{mm}]$	Visina
$v$	$[\text{m}/\text{s}]$	Brzina
$g$	$[\text{m}/\text{s}^2]$	Gravitacijsko ubrzanje
$p$	$[\text{N}/\text{m}^2]$	Tlak
$Q$	$[\text{m}^3/\text{s}]$	Protok, intenzitet strujanja
$A_{1,2}$	$[\text{m}^2]$	Površina poprečnog presjeka u točkama 1 i 2
$v_{1,2}$	$[\text{m}/\text{s}]$	Brzina strujanja u točkama 1 i 2
$t$	$[\text{s}]$	Vrijeme lijevanja
$t_s$	$[\text{s}]$	Vrijeme skrućivanja
$M_f$	-	Modul pojila
$M_c$	-	Modul odljevka

## SAŽETAK

U radu su opisane teorijske osnove lijevanja odljevaka uz naglasak na važnost pravilnog izbora pojila i vrata pojila te njihovog ispravnog pozicioniranja. Opisane su volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka. Obradeno je sedam pravila napajanja i pet glavnih mehanizama napajanja. Izrađen je CAD model sa tri varijante sustava napajanja. Napravljena je simulacija lijevanja i skrućivanja u programu QuikCAST. Izrađen je odljevak sa tri različite dimenzije vrata pojila. Potvrđeno je da u slučaju korištenja premalog vrata pojila u odljevku nastaje poroznost. Također je potvrđeno da se rezultati simulacije poklapaju s rezultatima dobivenim kod lijevanja odljevaka.

Ključne riječi: odljevak; pojilo; vrat pojila

## **SUMMARY**

In this paper the theoretical basis of casting with an emphasis on the importance of correct choice of riser and risers neck and their correct positioning are described. The volume changes during cooling and solidification of casting are also described. Seven feeding rules and five main feeding mechanisms are discussed. A CAD model with three versions of feeding system was made. Also, the simulation of casting and solidification in QuikCAST was done. Finally, casting with three different dimensions of risers neck was casted. It was confirmed that the usage of too small riser neck results in shrinkage porosity. It was also confirmed that the simulation results coincide well with the results obtained with casting.

Keywords: casting; riser; risers neck

## 1. UVOD

Lijevanje je tehnologija oblikovanja predmeta kojom se rastaljeni metal oblikuje ulijevanjem u kalup, u kojem skrućivanjem poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine. Koristi se više od 5000 godina za proizvodnju odljevaka definiranog geometrijskog oblika i svojstava. U tom razdoblju tehnologija se kontinuirano razvijala, tako da se danas mogu proizvesti visoko zahtjevne metalne komponente komplicirane geometrije pomoću najmodernijih mehaniziranih i automatiziranih uređaja. Tehnologija lijevanja je jedna od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Usprkos različitim konkurentnim i novim tehnologijama proizvodnje velika potražnja za odljevcima, zbog jednostavnosti proizvodnje nastaviti će se i dalje [1]. Izrada dobrih odljevaka traži veliku vještinu jer proces nastajanja odljevka nije vidljiv, odnosno metal popunjava zatvoreni kalup. Za razvoj ljevačkih postupaka, potrebna su znanja iz područja kemije, nauke o metalima, fizike, mineralogije, strojarstva, elektrotehnike i metalurgije [2]. Lijevanje metala prati čovječanstvo od samih početaka. Poznato je da su pojedina doba u povijesti nazvana upravo prema vrsti materijala koji se u tom vremenu lijevao i koristio za izradu oružja i oruđa, a koje je čovjek koristio u svakodnevnom životu. Tako postoje, bakreno, brončano i željezno doba [3].

Glavni cilj ljevača je postizanje konzistentne visoke kvalitete i zahtijevanih svojstava odljevaka uz što niže proizvodne troškove. Međutim, lijevanje metala kompleksan je postupak i često mogu nastupiti neočekivani rezultati budući da se vrlo velik broj faktora mora kontrolirati. Ti faktori mogu biti sljedeći: kvaliteta uložених materijala, proces taljenja i obrade taljevine, metalurško stanje i čistoća taljevine, temperatura i brzina lijevanja, kvaliteta kalupa, uljevni sustav i sustav napajanja odljevka itd. samo su neki od faktora koji utječu na konačnu kvalitetu i svojstva odljevaka [4]. Na slici 1. prikazano je ulijevanje taljevine pješčani kalup.



**Slika 1.** Lijevanje metala u kalup [5]

## **2. OPĆENITO O TEHNOLOGIJI LIJEVANJA**

Lijevanje je tehnologija kod koje se ukapljeni materijali, kao što su rastaljeni metali, izliju u kalupnu šupljinu, koja je posebno konstruirana, i ostave da se skrutnu. Nakon skrućivanja, izradak se vadi iz kalupa te ide na završnu obradu [6]. Visoka produktivnost i mogućnost izrade replika čine tehnologiju lijevanja iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. Zbog velike proizvodnosti pogodna je za automatizaciju. Lijevanje je često puta i jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutrašnjim šupljinama (npr. blokova motora i dr.), ili za velika i masivna kućišta strojeva [2]. Tehnologijom lijevanja je dijelove strojeva koji bi se inače radili u više dijelova moguće odliti u jednom komadu. Oblikovanje se vrši u tekućem stanju, a tekući metal (litina) zahtijeva, kao i sve tekućine, minimalni utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo što se kao uljevna sila najčešće koristi gravitacija. No utrošak energije ipak će biti znatan, jer materijal prethodno treba rastaliti. Važno je kod toga napomenuti da će utrošak energije biti povoljniji što je oblik složeniji, budući da utrošena energija ovisi o utrošenoj masi, a ne o složenosti predmeta [7]. Zbog toga je lijevanje nenadomjestiva tehnologija u izradi složenih dijelova.

U tablici 1. prikazane su prednosti i nedostaci tehnologije lijevanja [3].

Tablica 1. Prednosti i nedostaci tehnologije lijevanja

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> <li>• složena geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela odljevka</li> <li>• moguće dobiti dimenzijski točan oblik</li> <li>• moguće proizvesti vrlo velike odljevke</li> <li>• moguće korištenje bilo kojeg materijala</li> <li>• moguća masovna proizvodnja</li> <li>• velik raspon dimenzija – od 1g do 250 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ograničenja u mehaničkim svojstvima</li> <li>• dimenzijska točnost</li> <li>• kvaliteta površine</li> <li>• opasnost u proizvodnji</li> <li>• utjecaj na okoliš</li> </ul>

Ljevarstvo danas predstavlja sumu znanja s područja znanstvenih i tehničkih disciplina. Ljevački postupci usavršavani su saznanjima iz područja kemije, fizike, metalurgije, mineralogije, strojarstva, elektrotehnike i metalurgije što je dovelo do brzog razvoja proizvodnje odljevaka. Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji u obliku željeznog lijeva ili aluminijskog lijeva, npr. u jedan automobil ugrađeno je više od 100 odljevaka. Isto tako odljevci se koriste u strojogradnji, građevinskoj industriji, medicini, brodogradnji, za željeznička vozila, energetici, zračnoj i svemirskoj industriji, kao i kod lijevanja umjetničkih skulptura. [7]

Na slici 2. vidi se tipičan primjer odljevka u automobilskoj industriji.

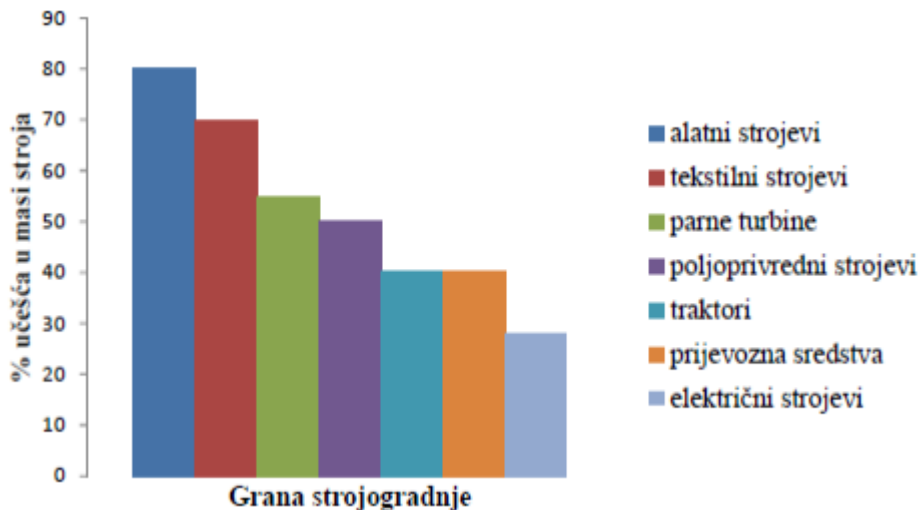


**Slika 2.** Blok motora BMW [8]

Proizvodnja odljevaka u pravilu se sastoji od tri međusobno povezane operacije: taljenja, kalupljenja te ulijevanja litine. Nakon hlađenja odljevka u jednokratnom kalupu, slijedi njegovo istresanje iz kalupa, čišćenje, brušenje, završna obrada i kontrola te skladištenje i otprema. Za vrijeme ulijevanja, skrućivanja i ohlađivanja, litina na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Svako od navedenih djelovanja ima utjecaja na kvalitetu odljevka, pa ih tijekom proizvodnje odljevaka treba svesti na najmanju moguću mjeru [3].



Na slici 3. se vidi udio pojedinih odljevaka u granama strojogradnje.

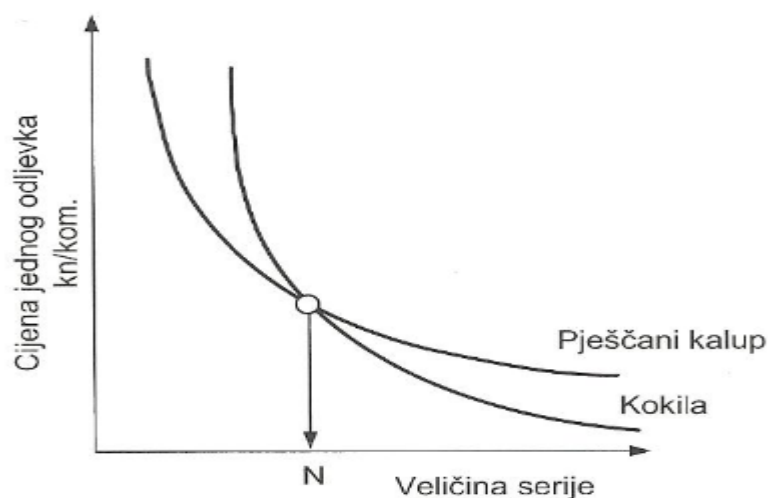


**Slika 3.** Prikaz udjela odljevaka u pojedinim granama strojogradnje [7]

Na histogramu se vidi značajni udio odljevaka u pojedinim granama strojogradnje. Odljevci u strojogradnji koriste se kao gotovi proizvodi ili se prije upotrebe obrađuju. Najveći udjeli odljevaka u masi stroja je kod alatnih strojeva (80 %), a najmanji kod električnih strojeva (30 %). Kod traktora i prijevoznih sredstava udio odljevaka u masi proizvoda je (40 %), a s obzirom na velike proizvodne serije, proizvodnja odljevaka za ove grane strojogradnje je značajna.

Izbor tehnologije lijevanja ovisi o nizu parametara kao što su: masa odljevka, dimenzije odljevka, vrsta legure koju treba lijevati, veličina serije i dr.

Na slici 4. Vidi se ovisnost cijene odljevka o veličini serije i vrsti kalupa.



**Slika 4.** Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [7]

Treba odabrati onu tehnologiju lijevanja odljevaka koja će dati najmanju cijenu jednog odljevka, uvažavajući da se odabranom tehnologijom lijevanja mogu zadovoljiti traženi uvjeti kvalitete.

## 2.1. Podjela postupaka lijevanja

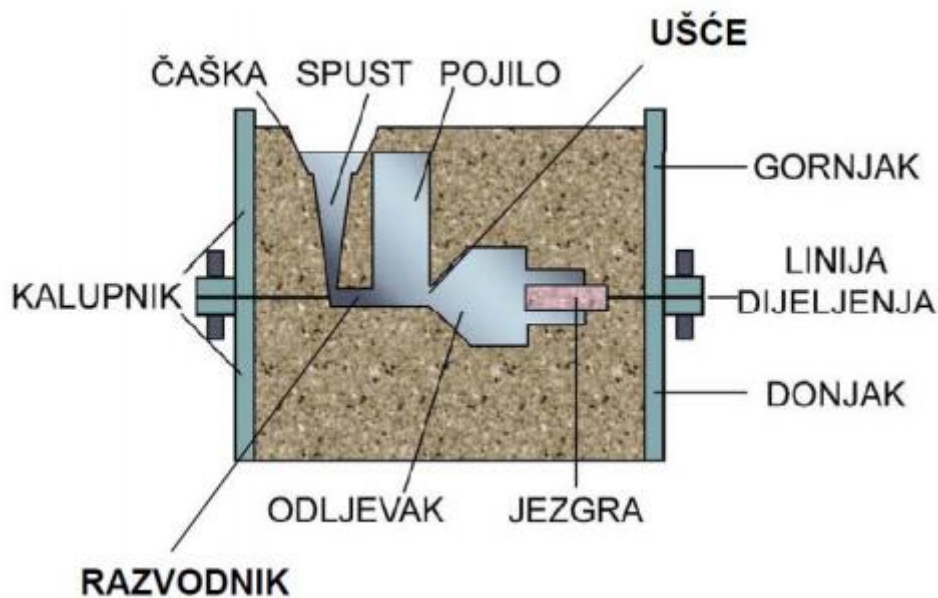
Proces lijevanja može se podijeliti obzirom na vrstu kalupa:

- lijevanje u jednokratne kalupe:
  - lijevanje u pijesak
  - školjkasti lijev
  - lijevanje u pune kalupe
  - točni (precizni) lijev
  - lijevanje u kalupe od gipsa
  - lijevanje u keramičke kalupe
  - vakuumsko kalupljenje pijeska
- lijevanje u stalne kalupe:
  - kokilni lijev
  - tlačni lijev
  - centrifugalni lijev [9].

### 2.1.1. Osnovna obilježja kalupa

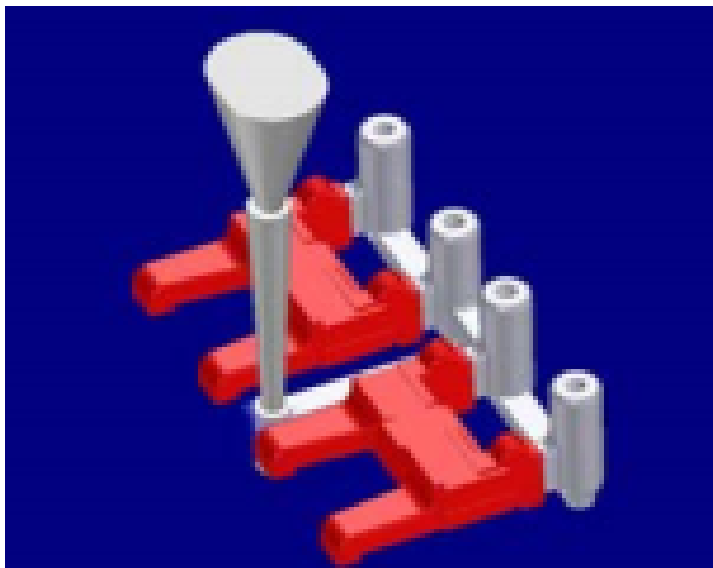
Kako bi se izradio odljevak taljevina se mora uliti u oblik koji odgovara izgledu odljevka. Nakon skrućivanja i hlađenja taljevine dobije se oblikovani proizvod. Ovako oblikovan proizvod naziva se odljevak, a zapremnina u kojoj se oblikuje naziva se kalup. Dakle, kalup je zapravo alat kojim se oblikuje odljevak. Pomoću kalupa ne oblikuje se samo vanjski oblik odljevka, nego se pogodnim umecima koje se nazivaju jezgre, odmah pri ulijevanju formiraju unutarnje šupljine i kanali u odljevku. Razlikuju se dvije vrste kalupa: jednokratni i stalni kalupi [4]. Stalni kalupi su u pravilu dvodijelni da bi se mogao izvaditi model nakon ulijevanja i hlađenja odljevka u kalupu. Kalup mora biti izrađen od materijala temperaturno višestruko otpornijeg nego što je lijevana legura. Zbog toga se odljevci od legura višeg tališta (npr. sivi, nodularni, čelični, legirani lijev), lijevaju u jednokratne kalupe koji su najčešće pješčani.

Na slici 5. Prikazan je jedan primjer dvodijelnog pješčanog kalupa.



Slika 5. Dvodijelni pješčani kalup [9]

Na slici 6. vidi se 3D prikaz jednog modela uljevnog sustava.



**Slika 6.** 3D prikaz jednog modela uljevnog sustava [9]

### 2.1.2. Lijevanje u jednokratne kalupe

Danas su jednokratni kalupi najrašireniji tip kalupa u tehnologiji ljevanja. Materijal od kojeg je izrađen jednokratni kalup ne baca se nakon lijevanja, nego se od istog materijala, uz određene tehnološke zahvate ponovno izrađuje kalup. Budući da se kod korištenja jednokratnih kalupa mora prije ulijevanja za svaki odljevak izraditi kalup, a s obzirom na najčešće veliki broj kalupa, oni se izrađuju u ljevaonici, s posebno u tu svrhu izvedenom opremom tzv. kalupnim linijama. Materijal od kojeg se izrađuje jednokratni kalupi naziva se kalupna mješavina, dok se izrada kalupa naziva kalupljenje. Kalupna mješavina sastoji se od osnovnog materijala, veziva i različitih dodataka [7]. Osnovni materijal može biti kvarcni ili kremeni pijesak. Najviše se upotrebljava kvarcni (kremeni) pijesak jer ga ima u velikim količinama gotovo u svim zemljama. Kao vezivo koristi se glina, cement, vodeno staklo, fenolne ili furanske smole.

Dodaci mogu biti kameni ugljen, grafit, koksni prah ili smola. Sastav kalupne mješavine ovisi od načina izrade kalupa, vrste legure i dimenzija odljevka. Tipična kalupna mješavina sastoji se od 90% pijeska, 3% vode i 7% gline i dodataka. Vezivo obično određuje vrstu jednokratnog kalupa. Ukoliko se koriste veziva koja vezuju fizikalnim silama tada se

kalupi nazivaju mekima, a ukoliko se vezivanje odvija kemijskim reakcijama, ti se kalupi nazivaju tvrdima [4].

Obilježja jednokratnih kalupa:

- kalupe je potrebno nakon lijevanja razrušiti kako bi se izvadio odljevak,
- kalupni materijal čini pijesak, gips i slični materijali te vezivo i dodaci,
- koriste se za složenije oblike odljevaka i konstrukcijskih dijelova [9].

Na slici 7. prikazan je primjer ručne izrade jednog pješčanog kalupa.



**Slika 7.** Sabijanje pješčanog kalupa [9]

Na slici 8. Prikazan je primjer ulijevanja litine u jednokratni pješčani kalup.



**Slika 8.** Primjer ulijevanja litine u jednokratni pješčani kalup [9]

### 2.1.3 Lijevanje u stalne kalupe

Stalni kalupi se mogu primijeniti više puta. Stalni kalup se naziva kokila i ima dobru toplinsku vodljivost, pa skrućivanje metala teče brzo. Struktura odljevka je zato sitnozrnata. Lijevanje u metalne kalupe zahtijeva manju radnu površinu nego li lijevanje u pijesak jer otpada manipulacija velikim brojem kalupnika i pijeska. Proces lijevanja u stalne kalupe može se mehanizirati i automatizirati [4]. Za vrijeme rada kalupi su izloženi visokim toplinskim opterećenjima. Oni se za vrijeme ulijevanja taljevine naglo zagrijavaju, a nakon vađenja odljevka naglo se hlade. Da bi kalupi mogli podnositi takva toplinska opterećenja, oni moraju biti izrađeni od materijala koji imaju potrebnu toplinsku vodljivost te otpornost na trošenje. Stalni kalupi izrađuju se od sivog lijeva ili legiranog čelika, dok se u novije vrijeme za izradu stalnih kalupa koriste i neke legure aluminija i bakra, te grafit za čelični lijev. Odabir materijala za izradu stalnog kalupa ovisi o vrsti legure koja se lijeva u kalup.

Obilježja stalnih kalupa:

- kalup se koristi više puta za proizvodnju velikog broja odljevaka,
- kalup je izrađen od metala ili rjeđe od grafita za čelične odljevke,
- ograničeni broj odljevaka,
- trajni kalupi su isplativiji u velikoserijskoj proizvodnji [9].

Na slici 9. prikazan je primjer jednog stalnog kalupa.



**Slika 9.** Stalni kalup [10]

Na slici 10. prikazan je primjer ulijevanja litine u stalni kalup.



**Slika 10.** Primjer ulijevanja litine u stalni kalup [9]

### 3. ULJEVNI SUSTAV

Uljevni sustav je skup kanala kojima rastaljeni metal teče u kalupnu šupljinu, tako da postignemo popunjavanje u što kraćem vremenu, sa što manjim pregrijavanjem.

Konstrukcija uljevnog sustava mora biti takva da se osigura brzo popunjavanje kalupa. Ako se taj uvjet ne osigura može doći do gubitka topline tekućeg metala tijekom punjenja kalupa, a to može rezultirati prijevremenim skrućivanjem, nepotpunim popunjavanjem kalupa ili nastajanjem površinskih grešaka. Ukoliko se taljevina pregrije povećat će se sposobnost tečenja i livljivost te će se spriječiti prijevremeno skrućivanje. Ako se taljevina prekomjerno pregrije povećat će se opasnost od naplinjenja taljevine i povećat će se toplinsko opterećenje kalupa [7].

Turbulentno punjenje i tečenje u uljevnom sustavu i kalupnoj šupljini može povećati mehaničko i toplinsko opterećenje kalupa stoga treba minimalizirati turbulencije.

Turbulentnim strujanjem taljevine povećava se opasnost od zahvaćanja plinova tekućim metalom zbog čega može doći do nastajanja grešaka na odljevcima poput plinske poroznosti ili mjehuravosti. Plinovi mogu i reagirati s litinom što može dovesti do stvaranja troske i uključaka u odljevcima. Najvišu osjetljivost na oksidaciju pokazuju legure aluminija te legure magnezija. Kod tih legura turbulencije mogu dovesti do stvaranja značajnog oksidnog filma koji može biti zahvaćen tekućim metalom, što često rezultira nastajanjem prevelikih grešaka na odljevcima. Odljevci sa takvim greškama se odbacuju. Zbog tih je razloga jako bitno da se što prije uspostavi stacionarno tečenje taljevine tijekom punjenja kalupa [11].

Uljevni sustav mora omogućiti ukljanjanje troske, metalnih oksida i uključaka prije nego što uđu u kalupnu šupljinu i odljevak. Osim uključaka koji mogu nastati unutar kalupne šupljine, potrebno je ukloniti i uključke koji potječu od vanjskih faktora. Zbog toga uljevni sustav mora biti konstruiran i dimenzioniran tako da omogući dovoljno vremena za isplivavanje uključaka iz mlaza taljevine prije nego što uđu u kalupnu šupljinu. Kod proizvodnje tankostjenih odljevaka je važno izbjegavanje deformacije odljevaka koje nastaju zbog nejednolične raspodjele topline i redoslijeda skrućivanja kalupne šupljine. Pri punjenju kalupne šupljine rastaljeni metal dolazi u kontakt s kalupnim materijalom. Temperatura taljevine u kalupu postepeno pada zbog odvođenja topline kroz stijenke kalupa prema okolini. Kada se dostigne likvidus temperatura započinje skrućivanje, odnosno fazna pretvorba iz tekućeg u kruto stanje. Tijekom skrućivanja dolazi do diskontinuirane promjene volumena, odnosno smanjenja volumena. Zbog toga na mjestu koje se zadnje skrućuje nastaje usahlina ili šupljina. Da bi se izbjegla prisutnost ove greške u odljevku na tom mjestu se stavlja pojilo [7].

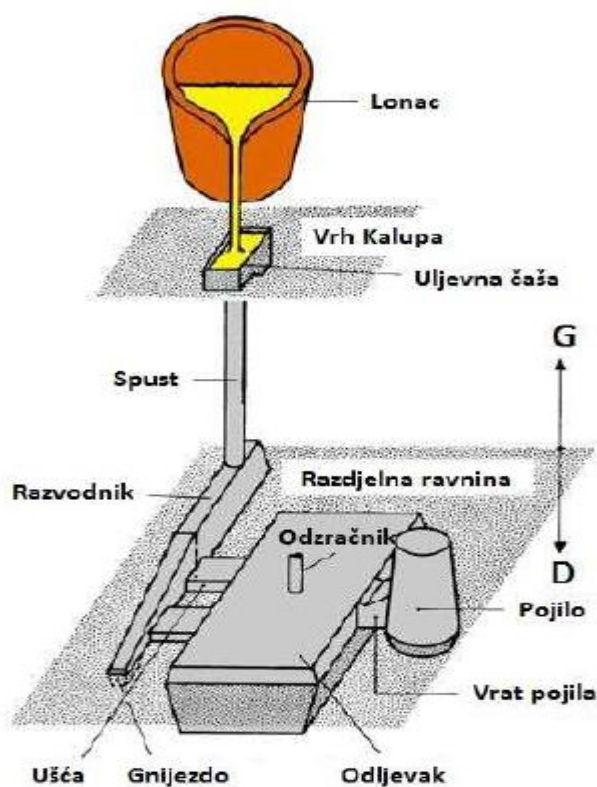


### 3.1. Dijelovi uljevnog sustava

Svaki uljevni sustav sadrži osnovne komponente neophodne za proizvodnju kvalitetnih odljevaka:

- uljevna čaša,
- spust,
- podnožje spusta,
- razvodnik,
- ušće, ili više njih,
- odzračnik, ili više njih,
- pojilo [11].

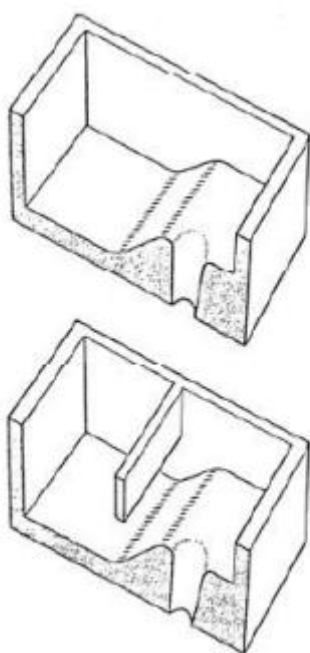
Broj komponenti i njihov raspored nije uvijek isti i ovisi o postupku lijevanja, materijalu koji se lijeva i mogućnostima izrade kalupa. Na slici 11. prikazan je klasičan primjer uljevnog sustava sa svim potrebnim komponentama.



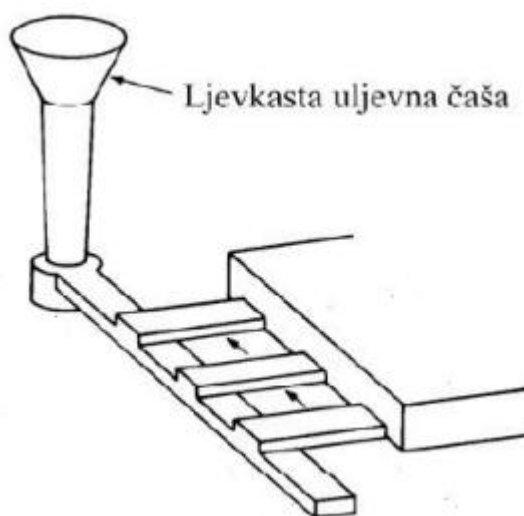
**Slika 11.** Primjer uljevnog sustava sa svim potrebnim komponentama [11]

### 3.1.1. Uljevna čaša

Služi kao i rezervoar taljevine tijekom lijevanja, održavajući uljevni sustav punim, sprječava rasprskavanje taljevine pri izlivanju iz lonca ta sprječava nasisavanje plinova i zraka, te ulaz troske. Razlikujemo koritastu uljevnu čašu i ljevkastu uljevnu čašu. Na slikama 12. i 13. prikazane su spomenute izvedbe uljevnih čaša.



**Slika 12.** Koritasta uljevna čaša [11]



**Slika 13.** Ljevkaasta uljevna čaša [11]

Koritasta čaša omogućuje izdvajanje metalnih oksida i troske iz taljevine prije ulaza u ostale dijelove uljevnog sustava. Prilikom lijevanja taljevina se ulijeva u dio uljevne čaše koji ima veću dubinu. Potrebno ju je uvijek držati punom. Ljevkaasta čaša služi jedino da ljevaču olakša direktno lijevanje taljevine. Dubina čaše mora biti 3-4 puta veća od promjera spusta da se nebi pojavio vrtlog koji uvlači zrak i trosku s površine taljevine.

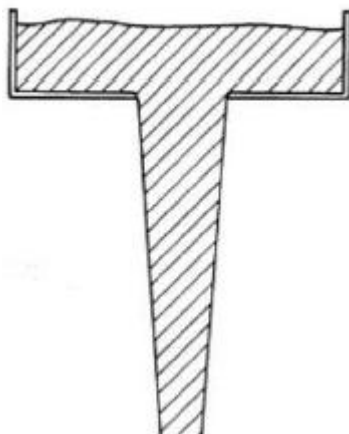
Volumen čaše može se odrediti pomoću slijedećeg izraza:

$$V_{\check{c}} = k \cdot \frac{m}{t \cdot \rho} \quad (1)$$

gdje je:  $V_{\check{c}}$  - volumen čaše ( $\text{dm}^3$ ),  $k$  – koeficijent koji ovisi o masi taljevine u kalupu ( $k=1,5 - 2,0$  za ljevkastu čašu, odnosno  $k = 3 - 8$  za koritastu uljevnu čašu,  $m$  – masa taljevine (kg),  $t$  – vrijeme lijevanja (s),  $\rho$  – gustoća taljevine ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) [11].

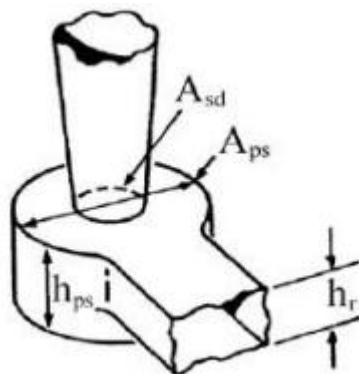
### 3.1.2. Spust

Spust je okomit kanal kružnog poprečnog presjeka kroz kojeg se taljevina iz uljevne čaše prenosi prema razvodniku. Pravilno konstruiran spust se sužava prema dolje. Zbog toga se smanjuju turbulencije i mogućnost ususavanja zraka. Na slici 14. prikazan je primjer pravilno konstruiranog spusta.



**Slika 14.** Pravilno konstruiran spust [11]

Na dnu spusta se obično nalazi podnožje spusta, no ono nije obavezano. Uloga podnožja spusta je smanjenje brzine mlaza taljevine i usisavanja zraka. Na slici 15. prikazan je primjer podnožja spusta sa svim potrebnim dimenzijama.



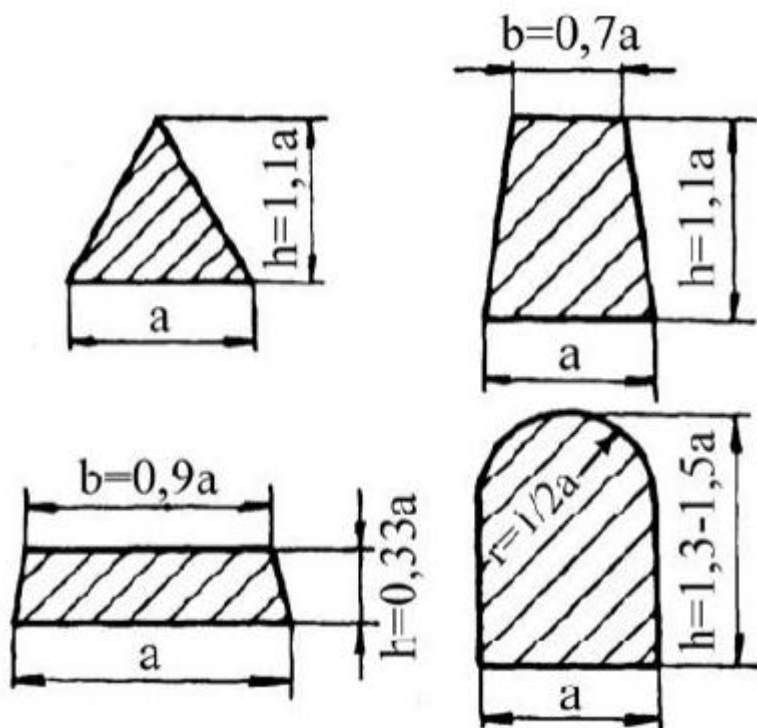
**Slika 15.** Podnožje spusta sa svim potrebnim dimenzijama [11]

$A_{ps}$  - površina poprečnog presjeka podnožja spusta,  $A_{sd}$  - površina poprečnog presjeka spusta,  $h_{ps}$  - visina podnožja spusta,  $h_v$  - visina razvodnika.

### 3.1.3. Razvodnik

Razvodnik i uljevna čaša su jedine komponente u uljevnom sustavu (osim filtra) koje mogu spriječiti ulazak uključaka i metalnih oksida u kalupnu šupljinu. Najviše se upotrebljavaju razvodnici trapeznog i pravokutnog poprečnog presjeka kod kojih je visina veća od širine, jer time omogućuje izdvajanje troske i nečistoća iz taljevine. Prilikom lijevanja u kalupe s horizontalnom diobenom ravninom, razvodnik se postavlja vodoravno. Vrstu uljevnog sustava određuje položaj razvodnika u kalupu: ako je semitlačni uljevni sustav onda je razvodnik u donjoj polovici kalupa, dok se u tlačnom razvodnik nalazi u gornjoj polovici kalupa.

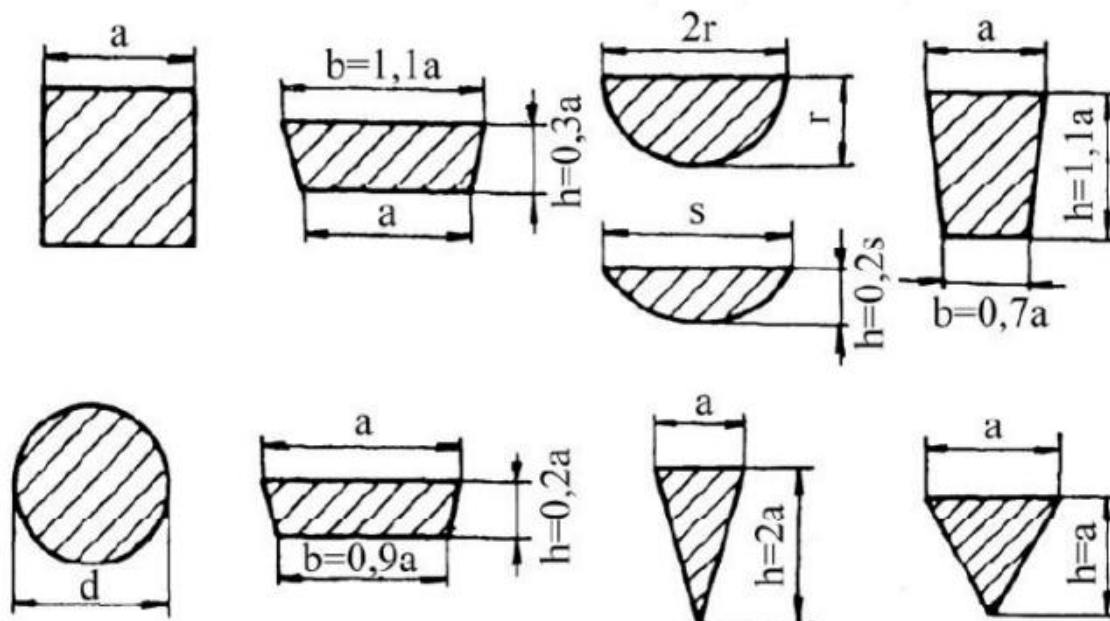
Uljevni sustav može imati jedan ili više razvodnika, što ovisi o veličini, obliku i broju odljevaka u kalupu. Razvodnici moraju biti tako konstruirani da se izbjegnu nagle promjene smjera tečenja taljevine jer uzrokuju stvaranje zona niskog tlaka i usisavanje zraka. Na slici 16. prikazani su mogući poprečni presjeci razvodnika.



Slika 16. Mogući poprečni presjeci razvodnika [11]

### 3.1.4. Ušće

Ušća su zadnji element uljevnog sustava i povezuju razvodnik s kalupnom šupljinom. Dimenzije i oblik ušća treba prilagoditi debljini stijenke odljevka i načinu njegovog odstranjivanja. Ukoliko se odstranjuje odlamanjem onda debljina ušća ne smije preći 60 – 70 % debljine stijenke odljevka, kako se odljevak nebi zalomio pri odstranjivanju uljevnog sustava. Ako se uljevni sustav odstranjuje rezanjem, debljina ušća može biti čak i veća od debljine stijenke odljevka. Najčešće se upotrebljavaju ušća pravokutnog poprečnog presjeka [11]. Na slici 17. prikazani su primjeri mogućih poprečnih presjeka ušća.



Slika 17. Mogući poprečni presjeci ušća [11]

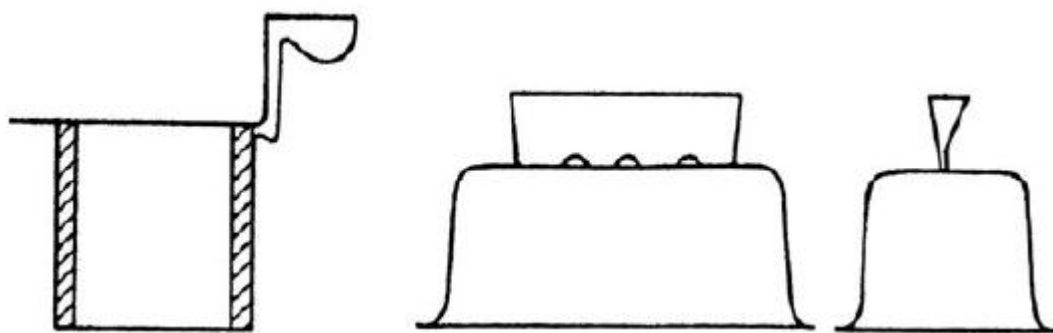
### 3.2. Vrste uljevnih sustava

Nekoliko je kriterija prema kojima se uljevni sustavi mogu podijeliti, a najvažniji su razdjelna ravnina i položaj ušća. Prema razdjelnoj ravnini, uljevne sustave dijelimo na vertikalne i horizontalne, a treba naglasiti i da su horizontalni uljevni sustavi češće korišteni u praksi.

Prema položaju ušća uljevni sustavi se mogu podijeliti u tri osnovne grupe:

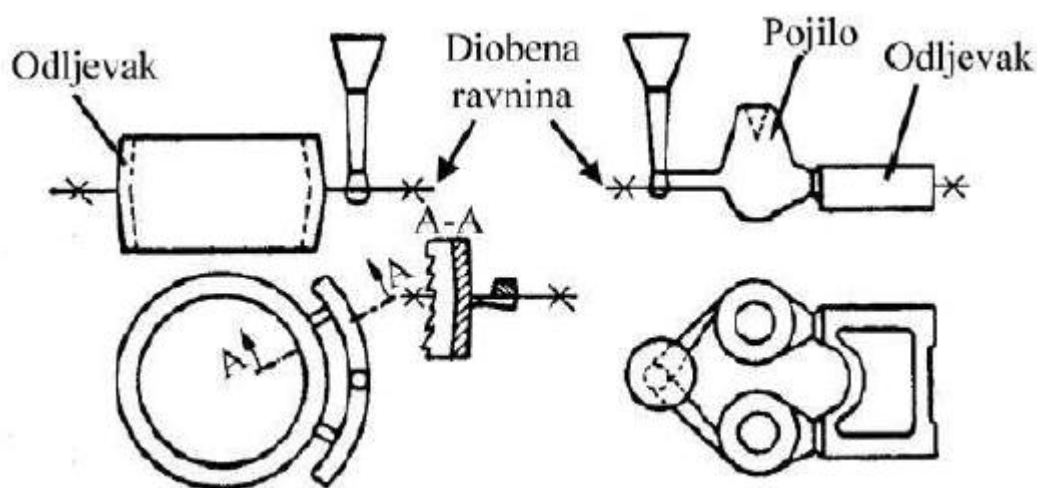
1. direktni uljevni sustavi sa ušćem odozgo (omogućuju brzo lijevanje, pravilno skrućivanje odljevaka i postepeno hlađenje),
2. indirektni uljevni sustavi sa ušćem na diobenoj ravnini (primjenjuje se kad to zahtjeva konstrukcija odljevka),
3. uljevni sustavi sa ušćem odozdo (mirniji način punjenja kalupne šupljine, neprirodan slijed skrućivanja, zahtjeva veća pojila) [11].

Direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo, rijetko se i teško primjenjuje za lijevanje velikih odljevaka jer taljevina u kalup ulazi velikom brzinom te djeluje udarno i erozivno na stjenku kalupa zbog čega se u odljevcima često stvara niz grešaka. Prednost direktnog uljavnog sustava jest brzo lijevanje te pravilno skrućivanje odljevka uz postepeno hlađenje jer je osiguran adekvatan temperaturni gradijent, odozdo prema gore. Slika 18. prikazuje direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo.



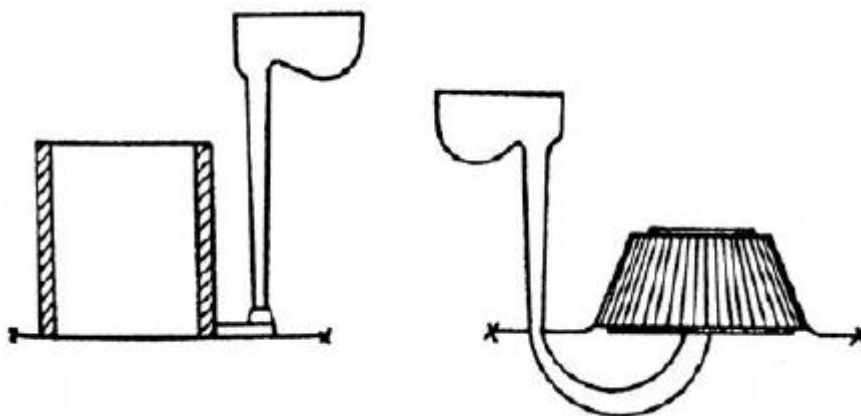
**Slika 18.** Direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo [11]

Međutim u upotrebi je puno zastupljeniji indirektni uljevni sustav, jer zadovoljava zahtjeve konfiguracije odljevka te zbog jednostavnosti kalupljenja. Procesi skrućivanja i hlađenja odljevka su složeniji jer je i složenost sustava veća zbog primjene razvodnika, pojila i ostalih dodatnih komponenti uljavnog sustava.



**Slika 19.** Indirektni uljevni sustav preko razvodnika i pojila [11]

Na slici 20. prikazan je primjer uljevnog sustava sa ušćem odozdo. Uljevni sustav sa ušćem odozdo rjeđe se primjenjuje iako omogućuje mirniji tok taljevine pri popunjavanju kalupne šupljine te je stoga pogodniji za lijevanje metala osjetljivih na oksidaciju. Treba naglasiti da se ovakvim uljevnim sustavom ostvaruje neprirodan slijed skrućivanja što rezultira primjenom većih pojila.



**Slika 20.** Uljevni sustav sa ušćem odozdo [11]

### 3.3. Dimenzioniranje uljevnog sustava

Uljevni sustav dimenzionira se počevši od dijela koji ima najmanji poprečni presjek, tzv. kritični presjek, koji određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu. Vrijeme punjenja kalupne šupljine također ovisi o kritičnom presjeku. Za pravilno dimenzioniranje uljevnog sustava potrebno je poznavati nekoliko temeljnih principa dinamike fluida [7].

Prije nego se izračunaju dimenzije pojedinih komponenti uljevnog sustava, potrebno je dali se radi o tlačnom ili semitlačnom uljevnom sustavu. Tlačni uljevni sustavi se još nazivaju sustavi s prigušenjem. Najvažnije karakteristike tlačnih uljevnih sustava su:

- svi dijelovi uljevnog sustava su puni tijekom lijevanja,
- uljevni sustav tijekom lijevanja je pod većim tlakom od atmosferskog,
- ako ima više ušća na jednom razvodniku, kroz svako ušće približno prolazi jednaka količina taljevine.



Najvažnije karakteristike semitlačnih uljevnih sustava ili sustava bez prigušenja su:

- zbog velike površine poprečnog presjeka ušća, taljevina sporije ulazi u kalupnu šupljinu, pa je manja mogućnost rasprskavanja, oksidacije taljevine i stvaranja vrtloga oko ušća,
- kinetička energija duž razvodnika pada, zbog toga ne protječe ista količina taljevine kroz sva ušća,
- uljevni sustav nije uvijek pun,
- masa taljevine je veća nego kod tlačnih uljevnih sustava, zbog čega je iskorištenje taljevine manje [11].

### 3.3.1. Primjena Bernoullijevog zakona

Uljevni sustav možemo promatrati kao posudu iz koje istječe taljevina. Prema Bernoullijevom zakonu, u svakoj točki punog sustava ukupna energija je konstantna, odnosno zbroj potencijalne energije, kinetičke energije i energije tlaka u svim presjecima je konstantan:

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho} = konst. \quad (2)$$

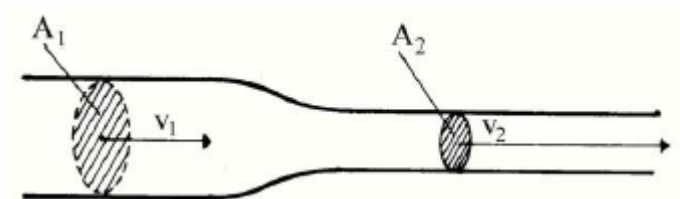
gdje je:  $h$  – visina,  $v$  – brzina,  $g$  – gravitacijsko ubrzanje,  $p$  – tlak i  $\rho$  – gustoća.

### 3.3.2. Primjena zakona o kontinuitetu strujanja

Prema zakonu o kontinuitetu strujanja, u sustavu s nepropusnim stjenkama koji je ispunjen nestlačivom tekućinom, intenzitet strujanja  $Q$  je konstantan u svim točkama sustava:

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = konst. \quad (3)$$

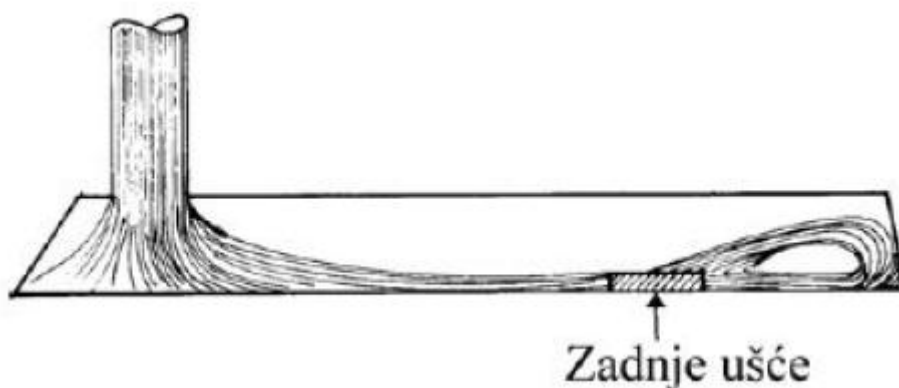
U jednadžbi (3)  $Q$  predstavlja protok, odnosno intenzitet strujanja,  $A_1$  i  $A_2$  su površine poprečnog presjeka kanala u točki 1, odnosno točki 2 (slika 21.),  $v_1$  i  $v_2$  su brzine strujanja fluida u točki 1, odnosno točki 2. Na slici 21. prikazana je brzina taljevine kroz različite veličine površine poprečnog presjeka.



**Slika 21.** Grafički prikaz zakona o kontinuitetu strujanja različitim površinama poprečnog presjeka [11]

### 3.3.3. Učinci momenta

Na samom početku lijevanja, taljevina u razvodniku će strujati konstantnom brzinom sve dok ne doprije u krajnju točku presjeka razvodnika gdje će doći do naglog usporavanja strujanja i smanjenja brzine na nulu. Zbog nove sile odnosno stjenke razvodnika, pojavit će se odbijanje i strujanje u suprotnom smjeru uz pojavu vrtloženja i turbulencija a posljedica bi mogla biti unošenje mlaza taljevine punog troske i nečistoća u kalupnu šupljinu kako je prikazano na slici 22.



**Slika 22.** Utjecaj sile na strujanje taljevine [11]

### 3.3.4. Vrijeme lijevanja

Vrijeme lijevanja ovisi o debljini stjenke odljevka, masi odljevka, vrsti legure, vrsti kalupa itd. Dva odljevka jednakih masa, ali različitih oblika, hlade se posve različito. Poznato je da se tankostijeni odljevci brže hlade od debelostijenih, zbog čega se moraju brže lijevati.

### 3.3.5 Dimenzioniranje kritičnog presjeka

Uljevni sustav dimenzionira se počevši od dijela koji ima najmanji poprečni presjek, kritični presjek, koji određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu. Za dimenzioniranje kritičnog presjeka upotrebljava se jednadžba kontinuiteta primijenjena na najuži, odnosno kritični presjek  $A_k$ :

$$Q = A_k \cdot v_k \quad (4)$$

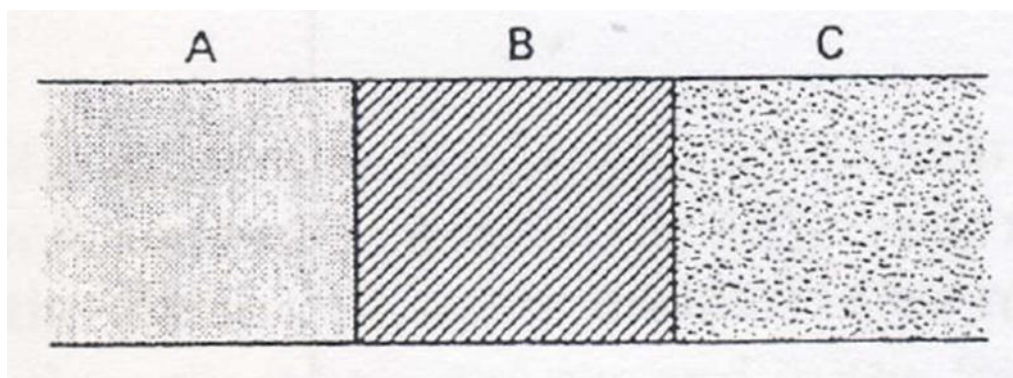
gdje je:  $Q$  - intenzitet strujanja kroz kritični presjek,  $A_k$  - površina kritičnog presjeka,  $v_k$  - brzina taljevine kroz kritični presjek.

## 4. NAPAJANJE ODLJEVAKA

Da bi se proizveo kvalitetan odljevak treba slijediti pravila napajanja i poznavati mehanizme pomoću kojih se napajanje odvija. Potrebno je također poznavati promjena volumena koje se događaju tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka i omogućuju pravilnu konstrukciju sustava napajanja. Kada govorimo o napajanju odljevaka to se prvenstveno odnosi na funkciju i položaj pojila. Glavni zahtjev pojila je da ostaju duže vrijeme u tekućem stanju nego komad koji se lijeva [12]. Nije uvijek lako postići dobro napajanje, a neuspjeh neminovno dovodi do stvaranja poroznosti uslijed skupljanja.

### 4.1. Prijenos topline i skrućivanje

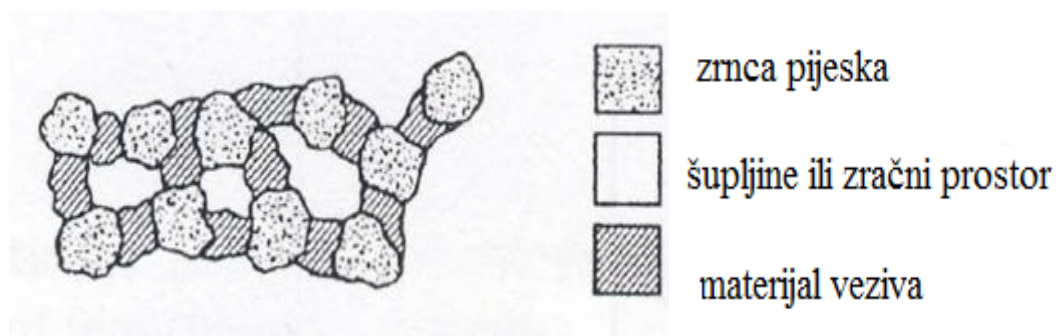
Vrući materijal će prenijeti svoju toplinu na druge tvari s kojima je u kontaktu, ali samo ako su hladnije. Toplina po zakonu termodinamike uvijek prelazi sa toplijeg na hladnije tijelo. Na slici 23. prikazan je primjer prijenosa topline u kalupu. Dio A predstavlja tekući metal, dio B predstavlja kruti metal koji je izgubio dovoljno topline i skrutio se, dio C predstavlja pijesak kalupa.



**Slika 23.** Prijenos topline u kalupu [12]

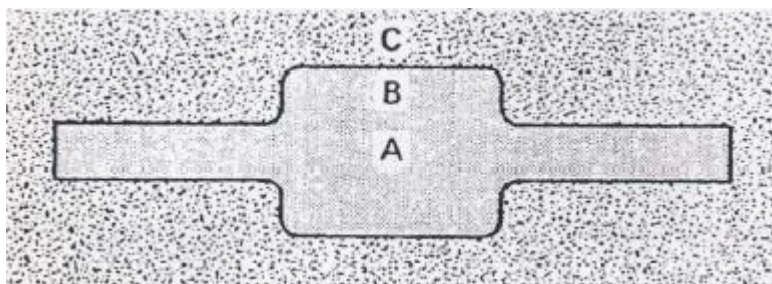
Na slici 23. prijenos topline u dijelu A događa se konvekcijom. U dijelu B prijenos topline događa se kondukcijom. Konvekcija jest gibanje, odnosno strujanje fluida (tekućina i plinova), u kojem se topliji fluid giba prema hladnijem i predaje toplinu hlađenjem. Kondukcija je prijelaz topline između dva tijela u dodiru, u našem slučaju to su rastaljeni metal i pijesak [12].

Na slici 24. prikazan je sastav pješčanog kalupa.



**Slika 24.** Prijenos topline unutar pijeska kalupa [12]

Prijenos topline između zrnaca pijeska i veziva događa se kondukcijom, a između zrnaca pijeska i šupljina ili zračnog prostora zračenjem. Toplina apsorbirana od kalupa također se prenosi gibanjem plinova, odnosno kondukcijom.

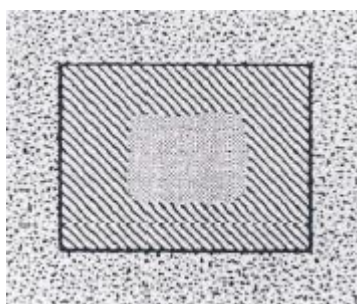


**Slika 25.** Kalup ispunjen rastaljenim metalom [12]

Na slici 25. prikazan je kalup ispunjen rastaljenim metalom. Temperatura u dijelu kalupa A će biti viša nego u B. Temperatura u B će biti viša nego u C i brzina prijenosa topline će biti najbrža od B do C. Prijenos topline će se odvijati samo od točke višom temperaturom do točke s nižom temperaturom, a razlika u temperaturi u određenoj udaljenosti naziva temperaturni gradijent. Kad rastaljeni metal postane dovoljno ohlađen počinje proces skrućivanja tj. da prelazi iz tekućine u krutinu.

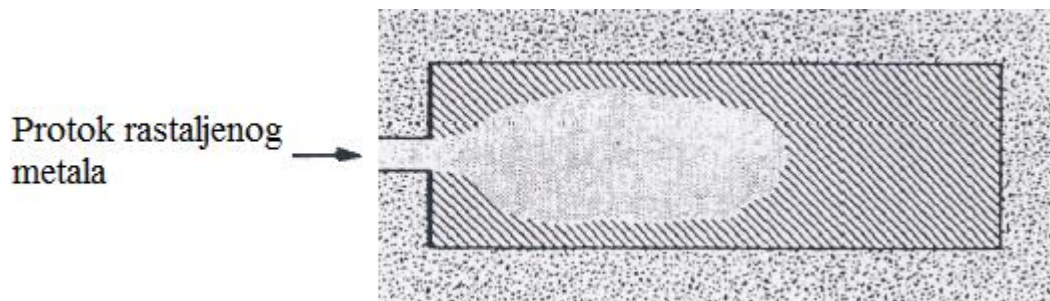
Postoje dvije vrste skrućivanja. Kad skrućivanja koje počinje po bokovima kalupa i napreduje više ili manje ravnomjerno prema središtu, takvo skrućivanje zovemo progresivno skrućivanje. Kad skrućivanje počne u dijelovima kalupa koji su najudaljeniji od novog rastaljenog metala i kreće se jednoliko u pravcu opskrbe njime, to zovemo usmjereno skrućivanje.

Slika 26. prikazuje progresivno skrućivanje, na isti način kako se kocka leda zamrzava.



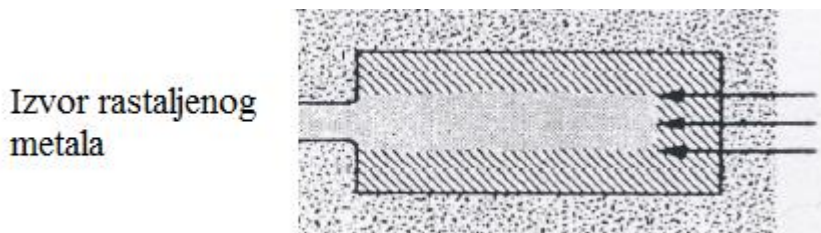
**Slika 26.** Primjer progresivnog skrućivanja [12]

Slika 27. prikazuje primjer usmjerenog skrućivanja.



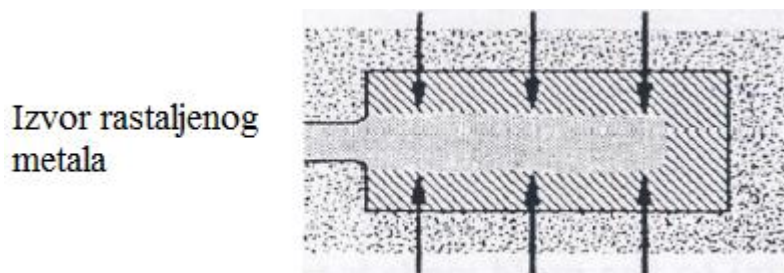
**Slika 27.** Primjer usmjerenog skrućivanja [12]

Usmjereno skrućivanje nastavlja prema opskrbi rastaljenog metala, slika 28.



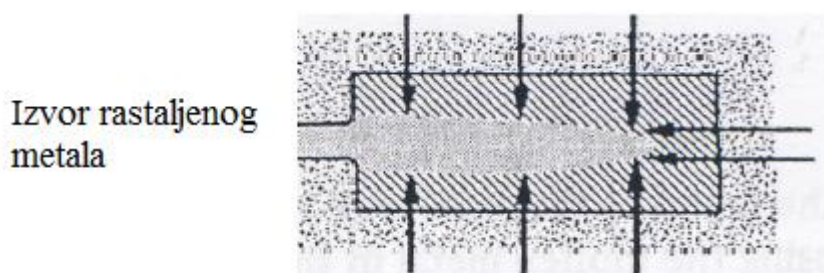
**Slika 28.** Primjer usmjerenog skrućivanja [12]

Progresivno skrućivanje nastavlja prema središtu odljevka, slika 29.



**Slika 29.** Primjer progresivnog skrućivanja [12]

A zajedno oba tipa skrućivanja na lijevani uzorak djeluju ovako, slika 30.

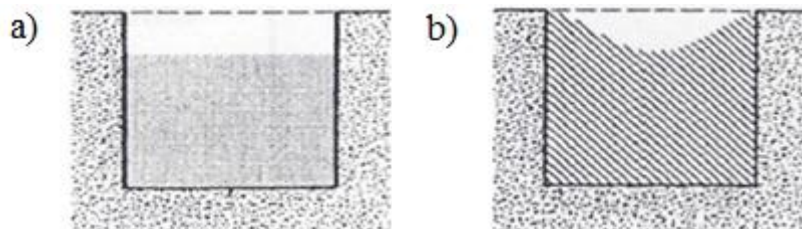


**Slika 30.** Progresivno i usmjereno skrućivanje [12]

Nažalost većina metala i legura se skuplja kada prolazi kroz proces skrućivanja tj. njihov volumen se smanjuje. Postoje 3 vrste skupljanja: u tekućem stanju, pri skrućivanju i u krutom stanju. Skupljanje u tekućem stanju događa se kada je metal još u tekućem stanju tj. događa se između temperature na kojoj se metal ulijeva u kalup i temperature na kojoj se počinje skrućivati [12].



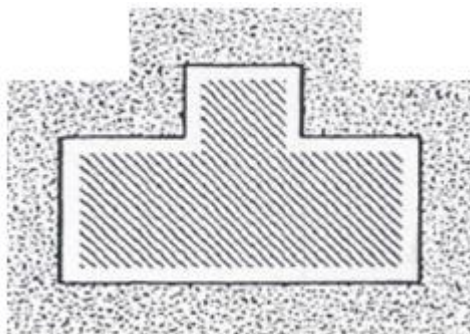
Drugi oblik skupljanja koji se događa naziva se skrućivanje. Obično uzrokuje slijeganje koje se formira na površini metala, slika 31.



**Slika 31.** Primjer skupljanja u tekućem staju i pri skrućivanju [12]

Oba kalupa prikazana ovdje punjena su rastaljenim metalom. Primjer a) skupljanje u tekućem stanju, primjer b) skupljanje pri skrućivanju.

Treća vrsta skupljanja događa se kada se krut hladi do sobne temperature i zove se skupljanje u krutom stanju, slika 32.



**Slika 32.** Skupljanje u krutom stanju [12]

Zapravo skupljanje u krutom stanju je više problem osobe koja radi model nego ljevača, jer ona mora konstruirati veći model od odljevka zbog skupljanja u krutom stanju, i pri tome kao pomoć koristi pravila skupljanja.



Prije nego počnemo govoriti o tome kako napojiti kalupnu šupljinu moramo spomenuti poseban slučaj željeznog lijeva. Željezni lijev je legura sa širokim intervalom skrućivanja te formira koru u hladnoj zoni na stjenci kalupa. Željezni lijev također prolazi sve faze skupljanja: u tekućem stanju, pri skrućivanju i u krutom stanju.

No, umjesto skupljanja tijekom procesa skrućivanja, kod nekih željeznih ljevova dolazi do njihove ekspanzije. Do ekspanzije dolazi zbog toga što se dio ugljika, koji je jedan od legirnih elemenata, izlučuje u obliku grafita. Pošto ugljik u obliku grafita zauzima veći volumen, a to stvara dodatni pritisak na stjenku kalupa.

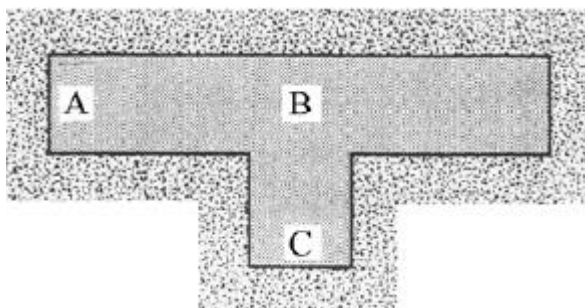
Precipitacija grafita može stvoriti dovoljan pritisak na stjenku kalupa da ga pogura prema van dajući kalup koji je veći nego što je bio kada se ulio željezni lijev u njega. Stoga kada koristimo željezni moramo ostaviti prostor za dodatan pritisak na stjenke kalupa koji je rezultat precipitacije grafita. Isto tako mora se napraviti pojilo veće nego za ostale metale, jer ekspanzija željeznog lijeva povećava veličinu kalupne šupljine.

Što se tiče željeznog lijeva preporuča se da svaka lijevaonica utvrdi eksperimentalnim putem veličinu ekspanzije i pomaka stjenke kalupa i tada odredi veličinu pojila iz prikupljenih podataka [12].

## 4.2. Vrste i položaj pojila

U većini slučajeva moramo koristiti rezervoare zvane pojila kako bismo osigurali dodatnu količinu rastaljenog metala. Glavni zahtjev koji se postavlja pred pojilo je da ostane u tekućem stanju dio odljevka koji napaja.

Teško je utvrditi čvrsta pravila za smještaj pojila, ali možemo pretpostaviti da svaki toplinski čvor treba biti napajan. Toplinski čvorovi su oni dijelovi odljevka koji ostaju najdulje vrući, ili točnije rečeno, dijelovi koji se zadnji skrote U odljevku oblika slova T toplinski čvor se nalazi u točki B, slika 33.

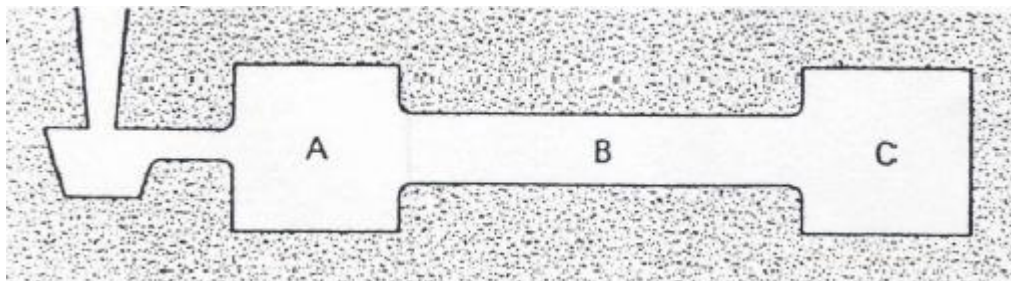


**Slika 33.** Odljevak oblika slova T [11]

Toplinski čvor nalazi se u točki B jer se u tom području nalazi velika količina (masa) taljevine, a unutarnji kutovi ograničavaju odvođenje topline iz tog područja [11]. U većini slučajeva možemo utvrditi dijelove na kojima će postojati toplinski čvorovi proučavanjem konstrukcije odljevka i apliciranjem informacija koje smo usvojili ranije proučavanjem prijenosa topline i skrućivanja.

Za pravilno određivanje položaja pojila potrebno je primijeniti koncept usmjerenog skrućivanja. Usahline u odljevku mogu se izbjeći ako se skrućivanje odvija usmjereno od točki koje su najudaljenije od pojila ka pojilu. Usmjerenim skrućivanjem postiže se skrućivanje od tanjih prema debljim presjecima odljevka i na kraju prema pojilu koje mora posljednje skrutnuti [11].

Na slici 34. prikazan je primjer napajanja odljevka.



**Slika 34.** Napajanje odljevka [12]

U normalnim okolnostima, dio B, koji sadržava najmanju masu metala, prvi će se skućiti. A dio, koji je najbliži površini rastaljenog metala, zadnji će se skućiti. U prethodnom primjeru, dio A i C mogu zapravo poslužiti kao pojila, s obzirom na to da napajaju skupljanje koje se dogodi u dijelu B. Kao što smo ranije spomenuli, pokušat će se postići usmjereno skućivanje gdje je moguće. U ovom primjeru, to znači da proces skućivanja treba početi u dijelu C i ići prema dijelu A. Kao što se vidi, na slici 34., rastaljeni metal ulazi u kalup u dijelu A. Postoji velika šansa da će nakon ulijevanja, skućivanje u dijelu B ići od stijenke kalupa prema unutrašnjosti odljevka. Drugim riječima, vjerojatno će se dogoditi progresivno skućivanje u dijelu B [12].

Takva vrsta skućivanja vjerojatno će onemogućiti napajanje dijela C. To znači da će nakon skućivanja tu doći do značajne poroznosti skupljanja. Najlakši da se spriječi poroznost skupljanja u dijelovima A i C jest da se doda više pojila.

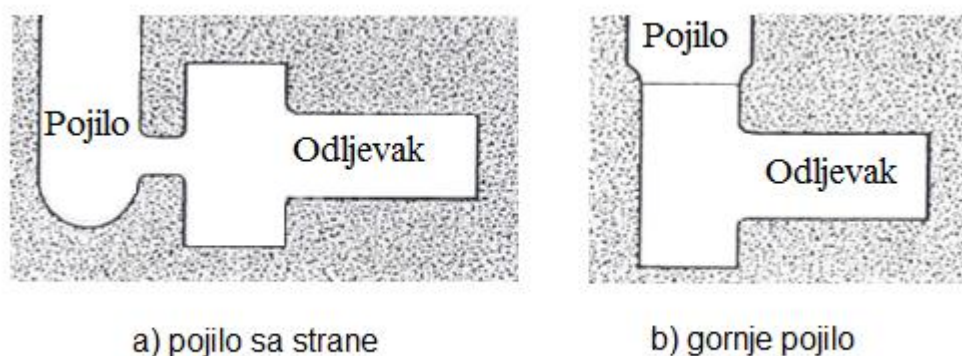
Do sad smo spomenuli samo jednostavne odljevke. U slučaju složenijih odljevaka često je dobra ideja da se ti odljevci promatraju kao da su podijeljeni na više zasebnih sustava napajanja. Naravno, to znači da svaki taj zasebni sustav mora biti napajan pomoću zasebnog pojila. Kod nekih odljevaka, debelostijeni odljevci napajaju tankostijene, a debelostijeni se napajaju pojilima. To nam daje usmjereno skućivanje koje želimo postići. Važno je zapamtiti da će se pod normalnim okolnostima tankostijeni dio skućiti prije debelostijenog dijela. Zbog toga se bilo koje pojilo koje se koristi mora postaviti tako da napaja debelostijeni dio.

U nekim slučajevima, oblik odljevka može onemogućiti smještaj pojila tamo gdje je to potrebno. Zato ljevač mora odlučiti, na temelju vlastitog iskustva, kako će spojiti pojila na odljevak da se omogući napajanje.

Upotreba pojila na bazi pokušaja i promašaja može rezultirati besmislenim i nepotrebnim troškom. Odgovarajući na iduća pitanja može se pronaći pojilo koje će biti praktično i ekonomično [12].

1. Trebamo li pojila? Mnogi odljevci, koji imaju pravilan sastav i napravljeni su u krutim kalupima, ne zahtijevaju pojila.
2. Kamo bi trebalo staviti pojila tako da odgovaraju zahtjevima i da se mogu ukloniti što ekonomičnije?
3. Koje veličine i oblika bi pojila trebala biti?
4. Kako mogu ostati u tekućem stanju što je duže moguće?

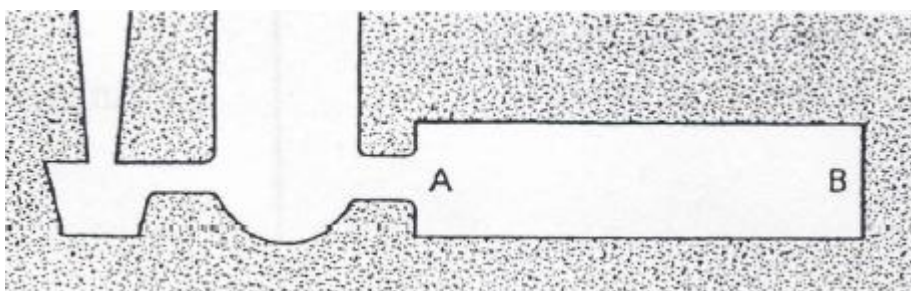
Iako postoji nekoliko oblika i veličina pojila, obično su samo dvije vrste u upotrebi. Te vrste su nazvane prema poziciji na odljevku. Na slici 35. prikazani su mogući položaji smještaja pojila.



**Slika 35.** Smještaj pojila [12]

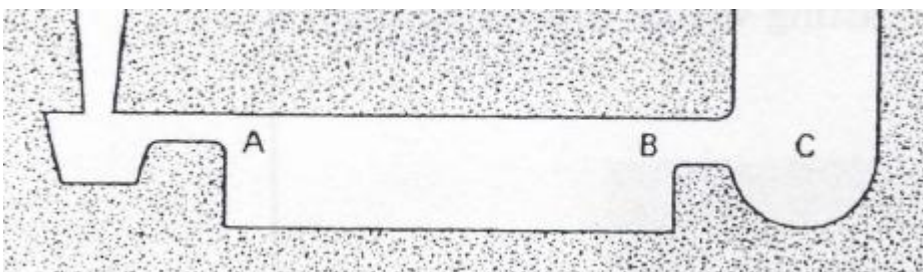
U primjeru a), pojilo je spojeno na stranu odljevka i naziva se pojilo sa strane. U primjeru b), pojilo je spojeno na vrh odljevka i zove se pojilo na vrhu ili gornje pojilo. Što se tiče lokacije, možemo staviti pojilo ispred odljevka, tako da metal mora teći kroz pojilo da bi došlo do odljevka, ili ga možemo staviti iza odljevka, tako da mora teći kroz odljevak kako bi došao do pojila.

Na slici 36. pojilo postavljeno ispred odljevka.



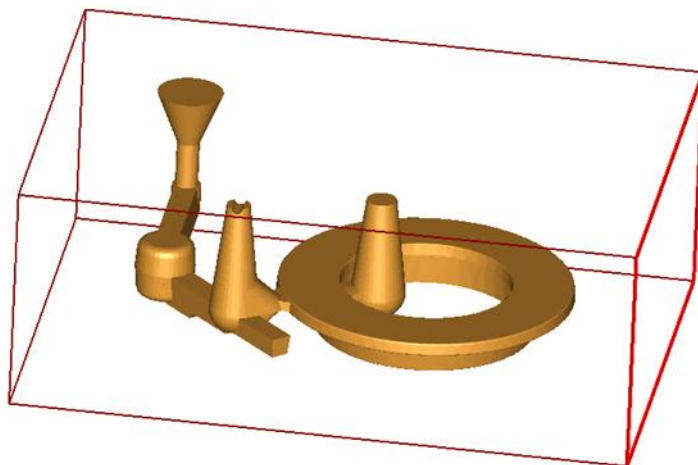
**Slika 36.** Pojilo ispred odljevka, ili toplo pojilo [12]

Na slici 37. pojilo smješteno iza odljevka.



**Slika 37.** Pojilo iza odljevka, ili hladno pojilo [12]

Obzirom na uljevni sustav razlikujemo hladno i toplo pojilo. Kod toplog pojila taljevina na putu prema kalupnoj šupljini najprije prolazi kroz pojilo tako da toplo pojilo ostaje popunjeno najtoplijom taljevinom, slika 36, što povoljno utječe na napajanje odljevka. U hladno pojilo taljevina dolazi tek kada je popunila kalupnu šupljinu, zbog čega se pojilo ispuni hladnijom taljevinom nego odljevak, slika 37. [11].



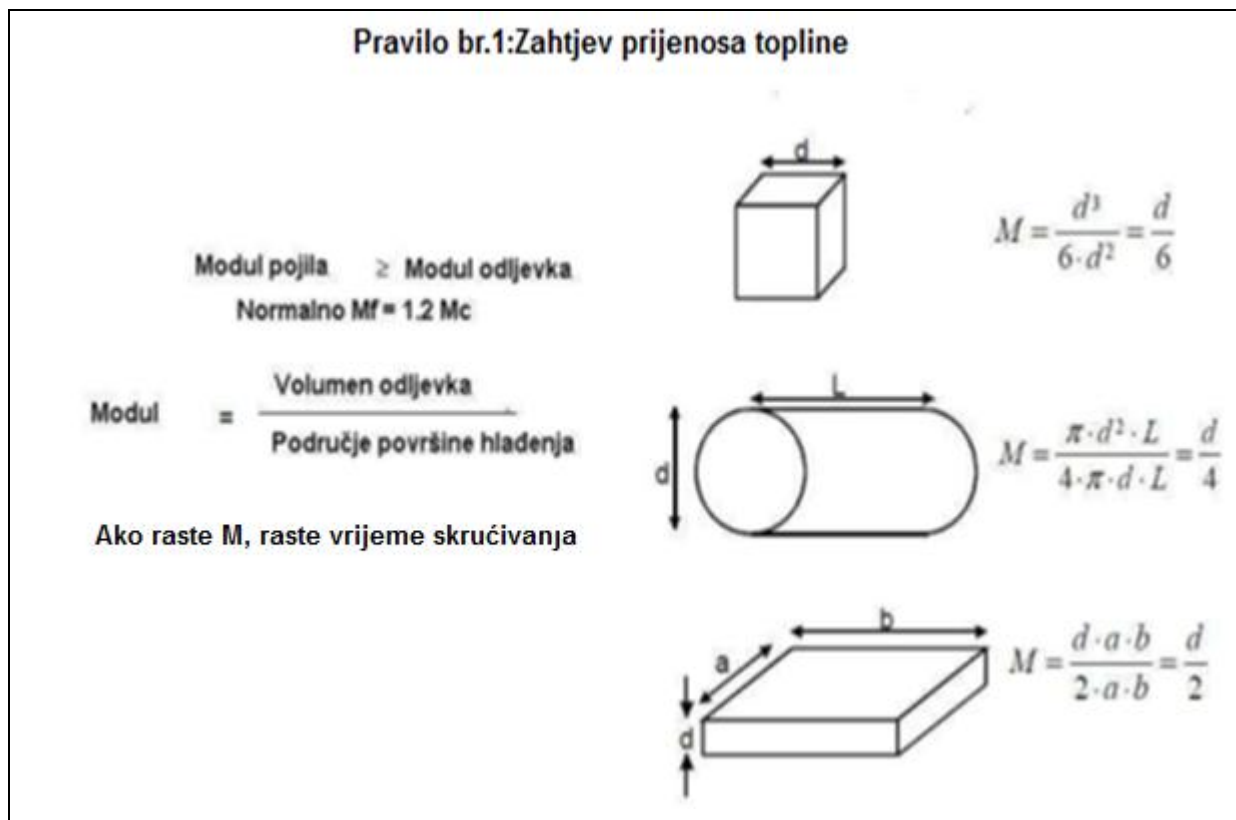
**Slika 38.** Odljevak sa toplim i hladnim pojilom

### 4.3. Pravila napajanja

#### *Pravilo broj 1: Zahtjev prijenosa topline*

Modul pojila mora biti jednak ili veći od modula odljevka, modul pojila  $M_f$  iznosi 1.2 puta modul odljevka  $M_c$ . Dodatnih 20 % koje je dano ovim izrazom je faktor sigurnosti koji se dopušta za pogreške i poteškoće u izračunavanju modula. Modul je definiran kao volumen odljevka podijeljen s površinom odljevka koja gubi toplinu.

Važno je uključiti samo one površine koje gube toplinu. Povećanjem modula povećava se vrijeme skrućivanja  $t_s$ . Modul je stoga korisno sredstvo predviđanja vremena skrućivanja [13]. Neki izračuni modula, za jednostavne oblike prikazani su na slici 39.



Slika 39. Pravilo broj 1 [13]

Kod izračuna modula složenih odljevka, normalno je da se dijelovi koji su dobro toplinski povezani smatraju cjelinom. Tako se aluminijski odljevak često može tretirati kao cjelina zbog svoje visoke toplinske vodljivosti. S druge strane, čelični odljevak često se rješava kao niz odvojenih osnovnih oblika.

### **Pravilo broj 2: Zahtjev volumena**

Pojilo mora sadržavati dovoljno taljevine kako bi se nadomjestio zahtjev stezanja volumena odljevka. Čak i ako se strogo slijedi pravilo broj 1 tako da daje  $M_f$  puno veći od  $M_c$ , moguće je da neće biti dovoljno taljevine da napoji, što rezultira pražnjenjem pojila i nastankom poroznosti skupljanja u odljevku. Relacije za izračunavanje potrebnog volumne prikazane na slici 40.

**Pravilo br. 2: Zahtjev volumena**

Potreban nadomjesni volumen  $= \alpha \cdot (V_c + V_f)$  gdje je  $V_c$  = Volumen odljevka  
 $V_f$  = Volumen pojila

Raspoloživo napajanje metala  $= \varepsilon V_f$  gdje je  $\varepsilon$  = Efikasnost pojila

→ za ispravan odljevak  $\varepsilon \cdot V_f \geq \alpha \cdot (V_c + V_f)$

Za aluminij  $\alpha \approx 7\%$  i za pješčani kalup  $\varepsilon \approx 14\%$

→  $0.14 \cdot V_f \geq 0.07 \cdot (V_c + V_f)$

Približno  $2 V_f \geq V_c + V_f$

→  $V_f \geq V_c$

Iskorištenje samo oko 50%, za aluminij  
 Za čelik iskorištenje raste do ~78%

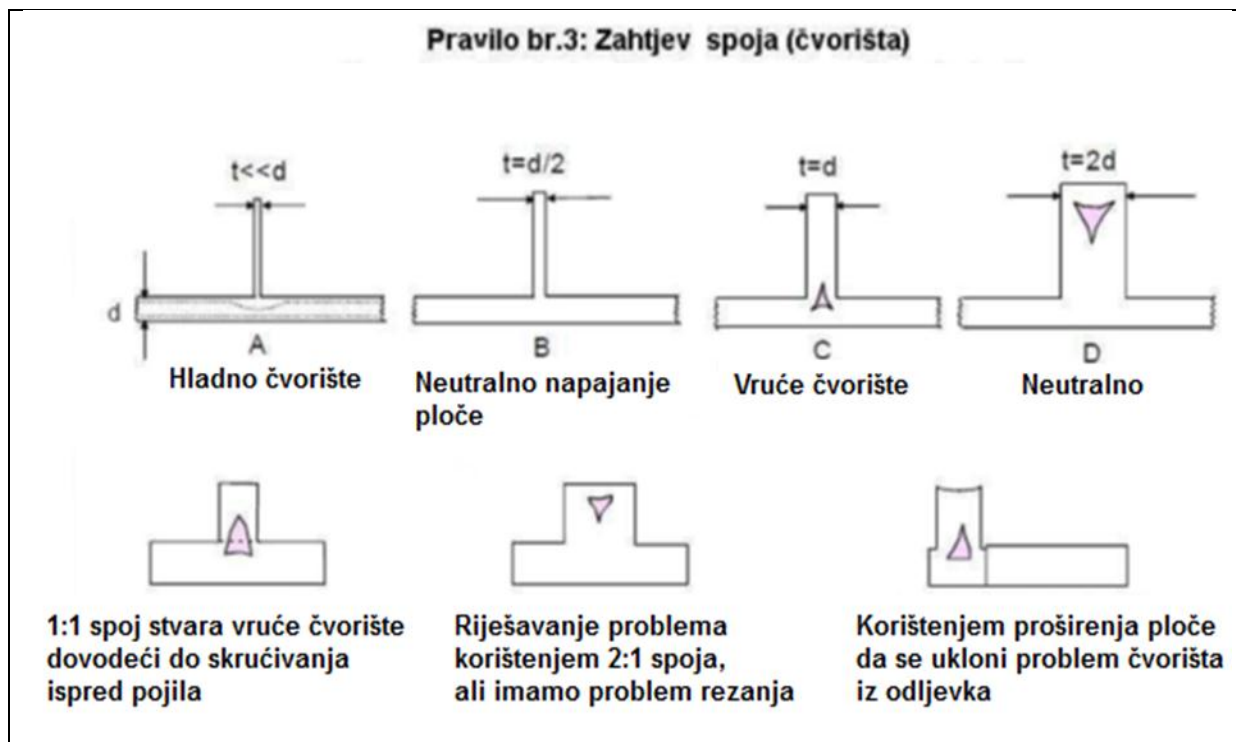
Slika 40. Pravilo broj 2 [13]

**Pravilo broj 3: Zahtjev čvorišta**

Čvorište, odnosno spoj između odljevka i pojila ne smije stvoriti vruće čvorište, slika 41. To pokazuje niz T spojeva između ploče debljine  $d$  i susjedne ploče promjenljive debljine  $t$ , slika 41. Čvorište A sastavljeno je od tankog lima debljine  $t \ll d$  koji se spaja na ploču. Čvorište A djeluje kao hladan spoj. Ovaj efekt se ponekad iskorištava kada je potrebno postići brže hlađenje, kao alternativa hladilu postavljenom u kalup.

Kad se jedna ploča debljine  $d$  spaja s pločom koja je pola tanja, čvorište B, učinci hladnih i vrućih čvorišta su uravnoteženi i daju neutralno čvorište. To znači da se čvorište B može koristiti kao ulaz u kalup, jer nema učinak na odljevak.





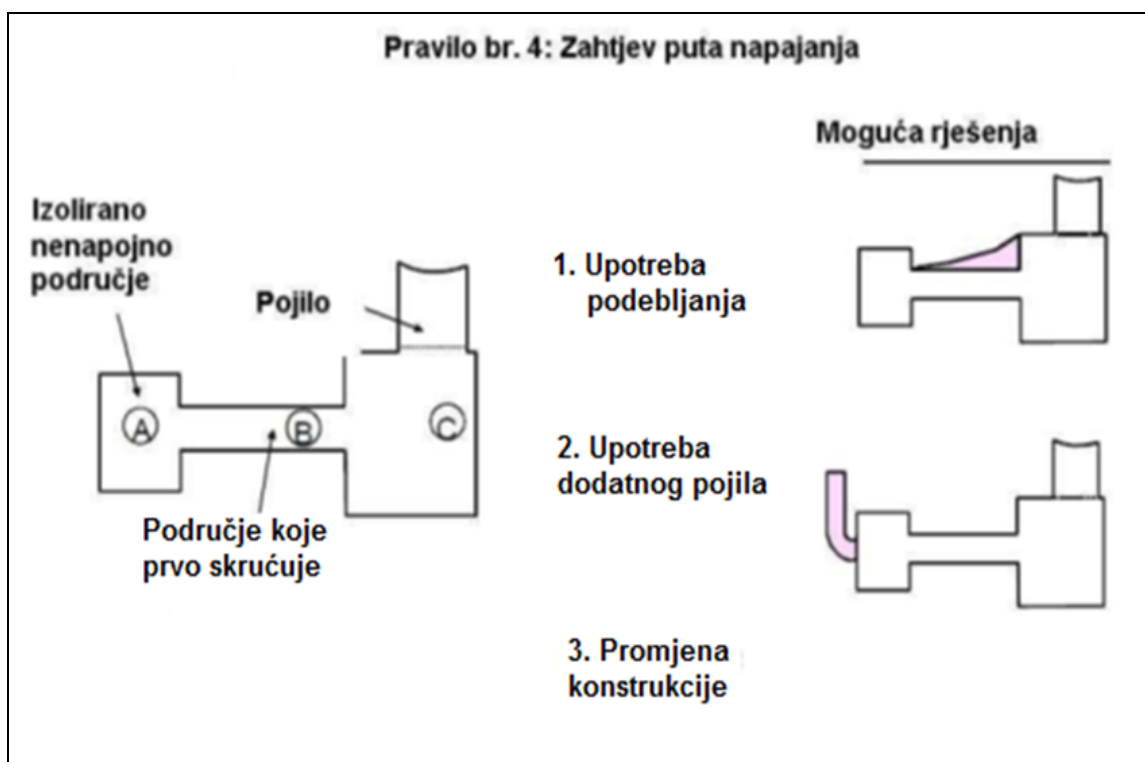
Slika 41. Pravilo broj 3 [13]

Kod čvorišta C su spojena dva dijela jednake debljine ( $d = t$ ) što stvara vruću točku. Skrućivanje se odvija sporije na spoju T jer pijesak postaje vrlo vruć u ovom području.

Čvorište D ima odnos 2:1 i geometriju sličnu onoj čvorišta B što znači da je također neutralno i da je taj raspored koristan kao pojilo. Ako se pojilo stavi na odljevak kao što je prikazano ovdje, stvara se vruće čvorište. Kao rezultat toga, neizbježno se dobije poroznost skupljanja na bazi pojila.

**Pravilo broj 4: Zahtjev smjera napajanja**

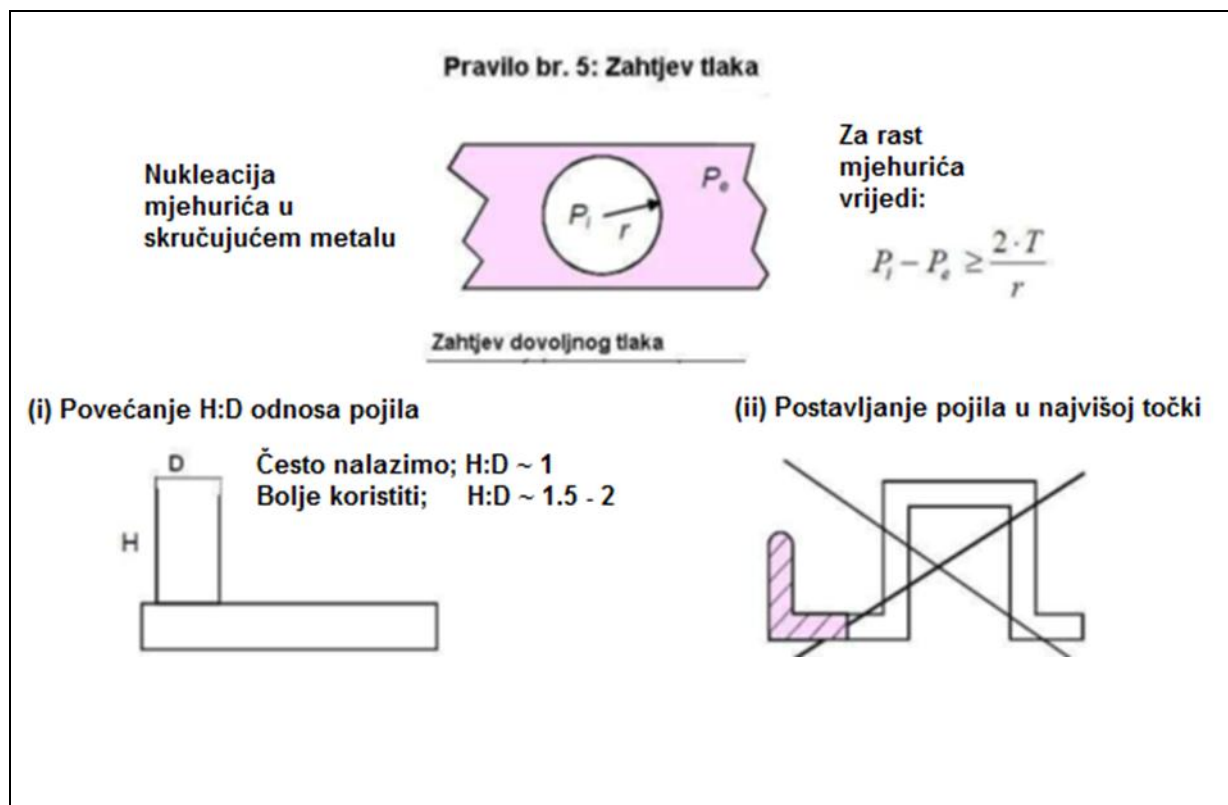
Ono navodi da je potrebno imati povezanost između pojila i dijela odljevka koji se napaja. To se čini prilično očitim, ali se često previdi i to je teško postići. Jedan od načina da se ovo riješi, što se često koristi u ljevaonicama čelika, je da se koristi podebljanje stjenke u smjeru pojila. Jedna od mogućnosti je da se koristi dodatno pojilo, iako to nije uvijek moguće i može ga biti teško ukloniti. Bolja alternativa može biti pregovor s kupcem o promjeni konstrukcije odljevaka. Na slici 42. prikazane su sve tri mogućnosti



**Slika 42.** Pravilo broj 4 [13]

**Pravilo broj 5: Zahtjev tlaka**

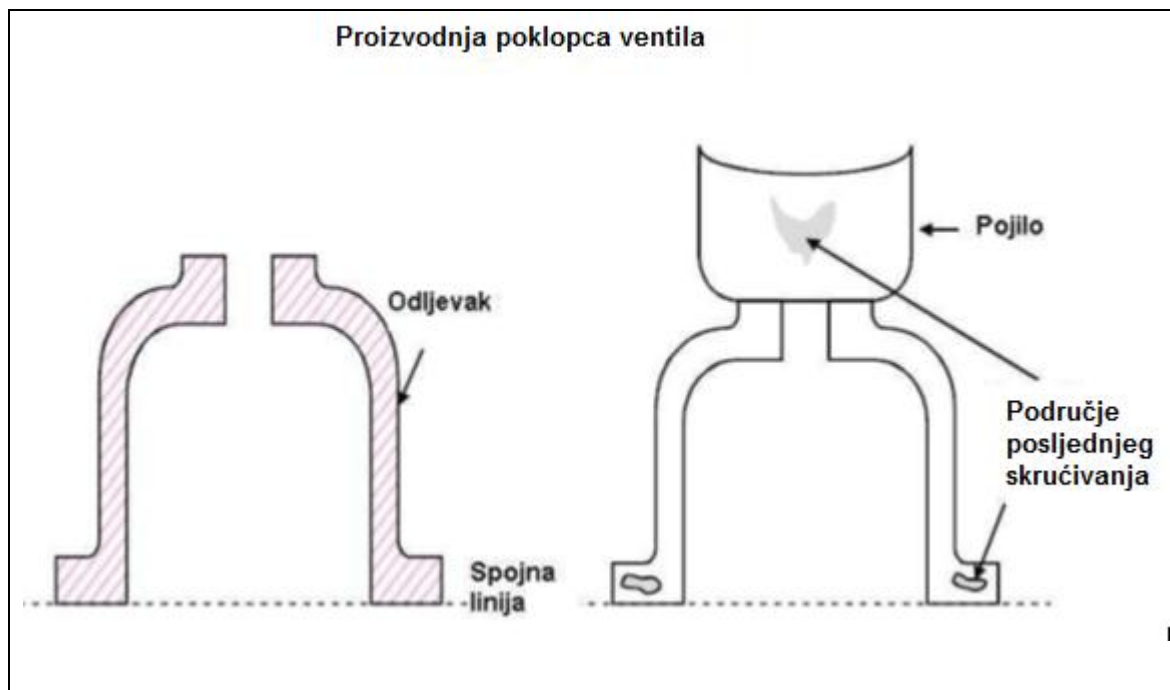
Pravilo broj 5 znači da se mora dovoljan tlak svim dijelovima koji skrućuju kako bi se spriječila nukleacija i rast volumnih grešaka. Primjena ovog pravila prikazana je na slici 43.



**Slika 43.** Pravilo broj 5 [13]

**Pravilo broj 6: Zahtjev gradijenta tlaka**

Mora postojati dovoljna razlika tlaka da se osigura protok rastaljenog metala i da protok bude u ispravnom smjeru. Rastaljeni metal teče kao rezultat guranja izvana i uvlačenja iznutra pri čemu neto tlak mora biti viši u pojilu nego u području odljevka koji se napaja. Primjer iz prakse za ovo pravilo je odljevak poklopca ventila s debljim dijelom na vrhu i debljim dijelom priрубnice koje spaja tanka stjenka [13]. Vjerojatno će oba izolirana deblja dijela trebati napajanje ako ih se želi proizvesti bez poroznosti uslijed skupljanja. Primjer iz prakse prikazan je na slici 44.



Slika 44. Pravilo broj 6 [13]

**Pravilo broj 7: Nulto pravilo**

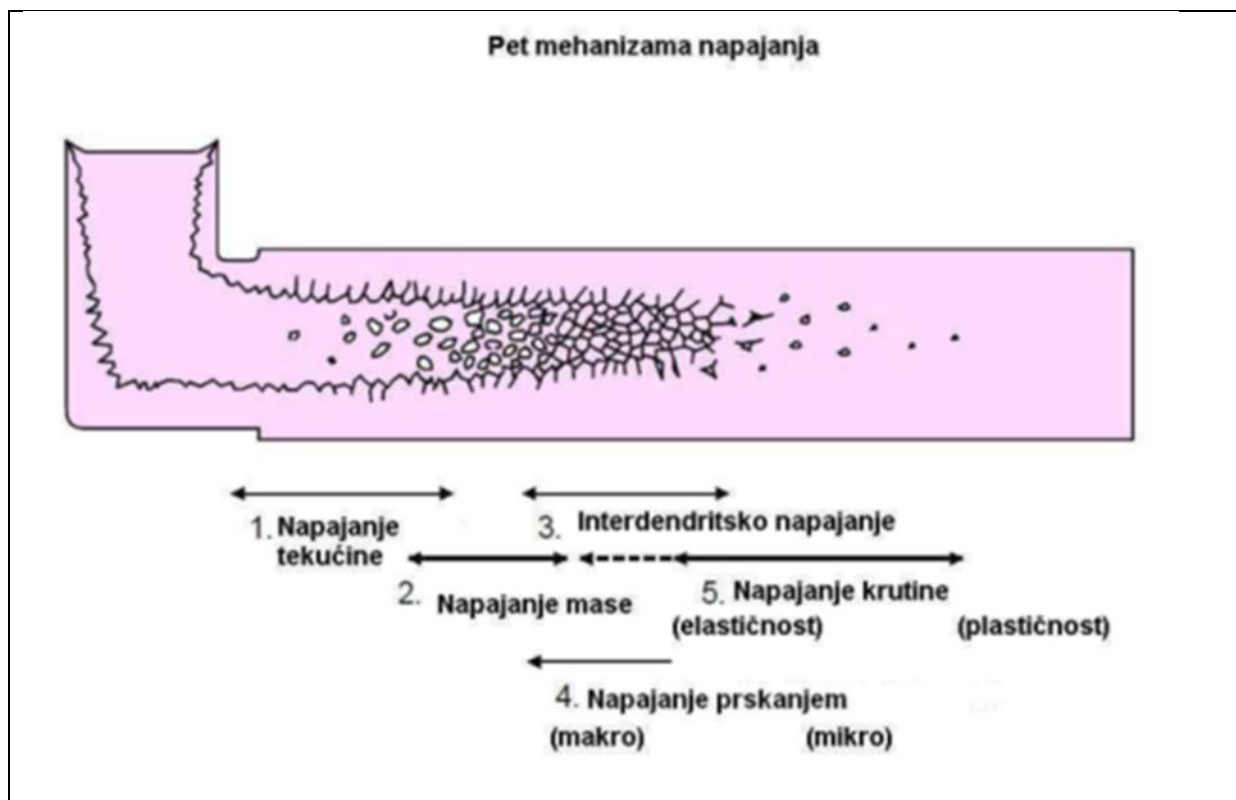
Nulto pravilo, koje glasi da ne treba napajati odljevak, osim ako je to apsolutno nužno. To rješava čest problem konstruiranja učinkovitog sustava napajanja. Eliminacija napajanja također donosi ekonomsku korist, kao što je poboljšanje iskoristivosti i smanjenja radova na odljevku, jer više nije potrebno rezati pojilo od odljevka. Na slici 45. prikazan je praktični primjer primjene ovog pravila kod proizvodnje kućišta koji je proizveden bez pojila.



**Slika 45.** Pravilo broj 7 [13]

#### **4.4. Mehanizmi napajanja**

Postoji pet glavnih mehanizama koji se mogu prepoznati, a pomoću kojih se odvija napajanje i prikazani su na slici 46. Mehanizmi se odvijaju po određenom redoslijedu iako se svi ne pojavljuju u svakom odljevku. Redoslijed odvijanja je od "otvorenih" sustava do "zatvorenih" sustava napajanja.



Slika 46. Mehanizmi napajanja [13]

**1. Napajanje tekućine:**

Prethodi drugim oblicima napajanja. Kod materijala sa skrutnutom korom - poput čistih metala i eutektika - to je jedina vrsta procesa napajanja. Budući da tekući metal ima tako nisku viskoznost (blizu onoj za vodu) taj mehanizam radi učinkovito pri zanemarivo malim gradijentima tlaka. Zato, za sve praktične svrhe, ako se u pojedinom odljevku može osigurati tekuće napajanje tada će se naprezanja koja se mogu javiti u tekućini održavati na tako niskoj razini da neće doći do praktičnih poteškoća.

**2. Napajanje mase:**

Djelovanje napajanja mase je osjetljivo na relativnu veličinu zrna i debljinu dijela (sekcije, presjeka) skrutnutog odljevka. Na primjer napajanje mase ne može djelovati u tankim sekcijama (presjecima) odljevka s neusitnjenim zrnima.

Napajanje mase se poboljšava kako se povećava debljina sekcije i kako veličina zrna postaje manja. To je tako zato što ako je sekcija uska i ako su zrna velika, ona zadiru jedno u drugo na bočnim stjenkama odljevka, pa se ne mogu slobodno kretati.

### **3. Interdendritsko napajanje:**

Treći mehanizam napajanja je interdendritsko napajanje. Kako se dendritska mreža zgušnjava, interdendritski kanali postaju sve uži, i progresivno otporniji na protok preostale tekućine. Uvid u mehanizam se može dobiti ako se kanali tretiraju kao kapilare [13].

### **4. Napajanje prskanjem:**

Ovaj mehanizam se predviđa kao moguć, ali za to do danas ima vrlo malo dokaza jer računalni modeli još uvijek nisu dovoljno sofisticirani. Ideja je da se stvore uvjeti u kojima raste tlak uz prepreku za napajanje koji izaziva rušenje prepreke omogućavajući jaki nalet odnosno prskanje napojne tekućine. Takve prepreke su predviđene od mreže dendrita, nagomilanih kao rezultat napajanja masom, pogotovo ako ta gomila blokira uski put napajanja u veći dio koji zahtijeva napojni metal.

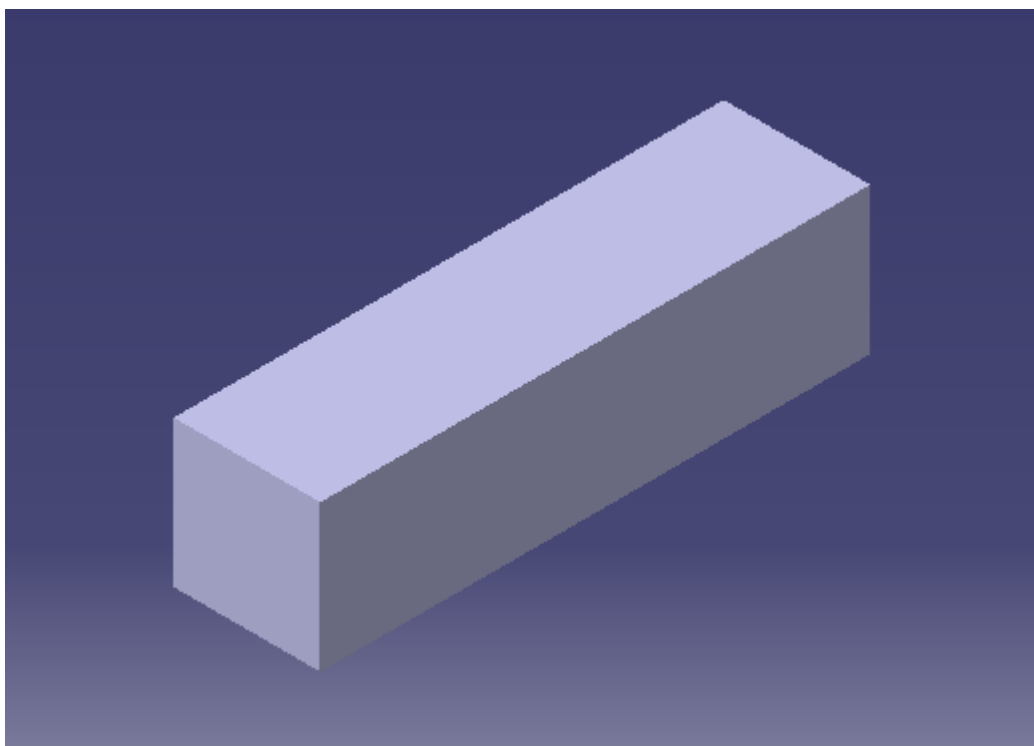
### **5. Napajanje krutine:**

Za razliku od napajanja prskanjem, napajanje krutine je mehanizam od velike važnosti za koji postoji mnogo dokaza. Bitno je shvatiti taj mehanizam temeljito da bi se razumjelo napajanje stvarnih odljevaka. Ova vrsta napajanja opisuje situaciju u kojoj je jedno područje odljevka ostalo odvojeno od dovoda napojne tekućine. Ovo područje mora se uzeti u obzir na bilo koji način. Jedan način je da raste kao pora uslijed skupljanja, ili da je tamo već postojala neka pogodna jezgra koja je omogućila stvaranje pore. Drugi način je da se kruta kora odljevka razbije prema unutra pod utjecajem unutarnjeg smanjenja tlaka, nadoknađujući tako manjak volumena. Napajanje krutine ustvari ublažava hidrostatsku vlačnu napetost nagomilanu protokom krutine prema unutra [13].

Da bi bili sigurni da je odljevak bez poroznosti, predloženi sustavi napajanja na temelju pravila, provjeravaju se simulacijama [14,15].

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

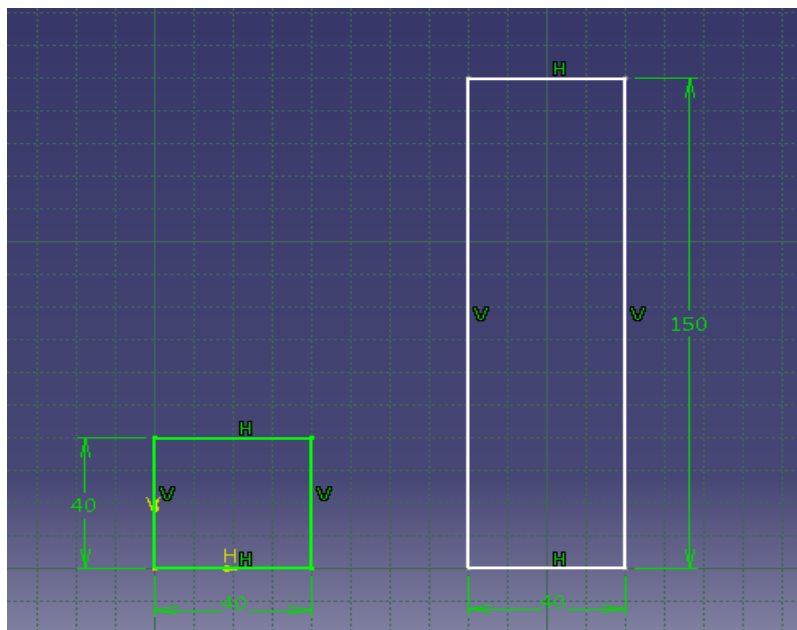
Kao eksperiment rada zadano je lijevanje odljevka od aluminijske legure dimenzija 40x40x150mm. Na temelju zadanog odljevka potrebno je bilo koristiti pravila i upute o odabiru pojila i vrata pojila te optimizirati uljevni sustav u svrhu dobivanja kvalitetnog odljevka. Izvršeno je lijevanje odljevka uz tri različita vrata pojila, a pomoću CAD modela odljevka sa uljevnim sustavima je provedena simulacija lijevanja u svrhu usporedbe kvalitete simuliranih i stvarnih odljevaka. Cilj eksperimentalnog rada jest bio pokazati utječe li i u kolikoj mjeri odabir veličine pojila i vrata pojila na kvalitetu odljevka, te usporedba rezultata simulacije sa rezultatima lijevanja. Slika 47. prikazuje CAD model odljevka.



**Slika 47.** CAD model odljevka

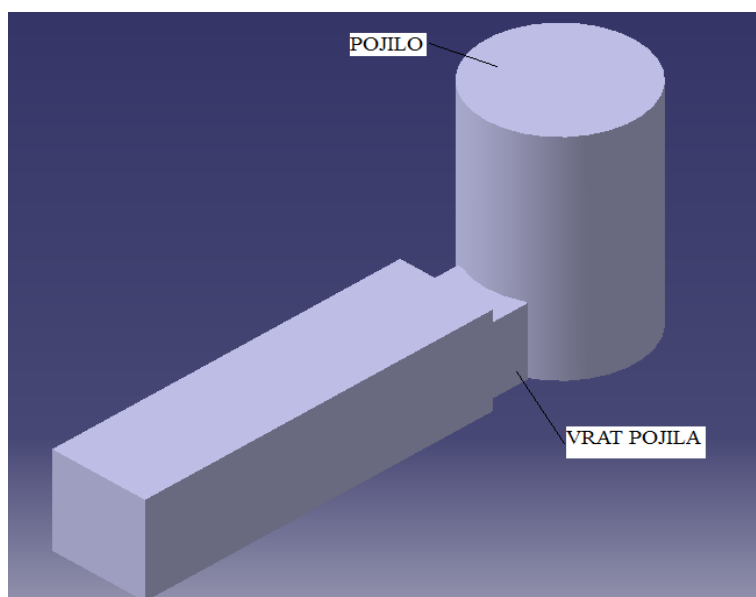


Slika 48. prikazuje dimenzije CAD modela odljevka.



**Slika 48.** Dimenzije CAD modela odljevka

Na slici 49. vidimo model sa uljevnim sustavom. Uljevanje litine vrši se kroz samo pojilo koje u našem slučaju zamjenjuje spust. U nastavku rada će se mijenjati dimenzije vrata pojila i dokazati kako je izbor toga dijela uljevnog sustava izuzetno važan za kvalitetan odljevak.



**Slika 49.** CAD model sa uljevnim sustavom

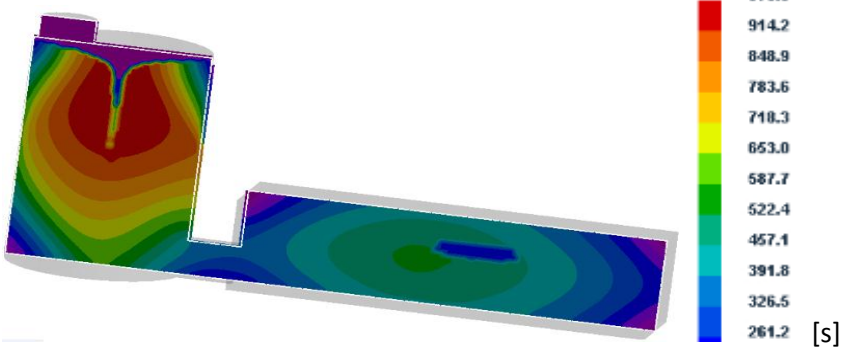
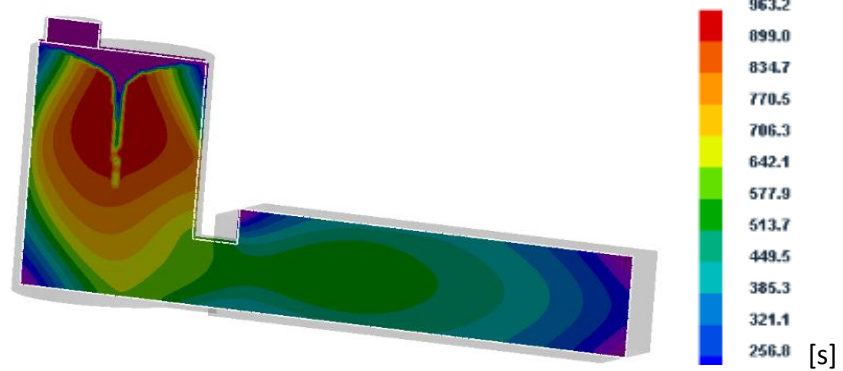
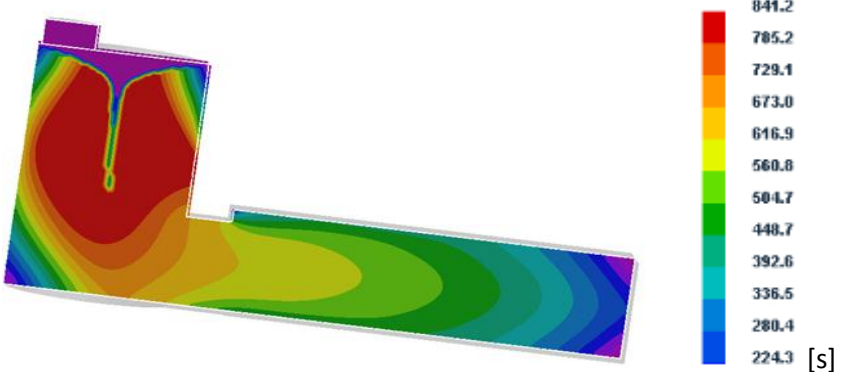
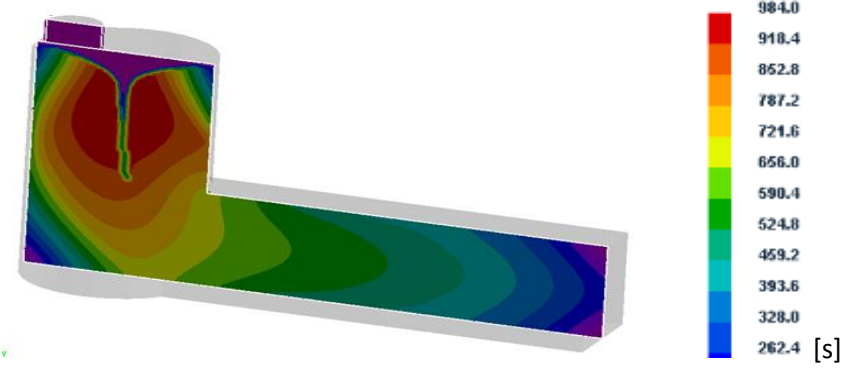
## **5.1. Simulacija ulijevanja i skrućivanja**

Za svaki postupak ulijevanja izvršena je i simulacija postupka koja daje uvid u zbivanja unutar kalupa tijekom lijevanja. Simulacijom su dobiveni podaci o potrebnom vremenu do postizanja solidus temperature, toplinskim modulima i poroznosti odljevka.

### **5.1.1. Lijevanje sa vratom pojila dimenzija 15x15, 26x26, 35x35 mm, i bez vrata**

U tablici 2. prikazana su vremena do postizanja solidusa, odnosno linije ispod koje je odljevak stabilan u krutom stanju, za dimenzije vrata pojila: 15x15, 26x26, 35x35 [mm], te bez vrata pojila.

Tablica 2. Vrijeme do solidusa [s]

Vrat (15x15 mm)	
Vrat (26x26 mm)	
Vrat (35x35 mm)	
Bez vrata	

U tablici 2. vidljivo je da do skrućivanja vrata pojila dimenzija 15x15 dolazi vrlo brzo te vrat pojila skrutne u prosjeku za nešto više od 260 sekundi, dok je vrijeme potpunog skrućivanja odljevka, od 522 do 588 sekundi. Taj podatak nam govori da vrat skrutne znatno prije nego sam odljevak te kao posljedica toga dolazi do prekida napajanja odljevka što izaziva izrazitu poroznost samog odljevka. To se lijepo vidi u tablici 3. Vjerojatnost poroznosti je 80 %.

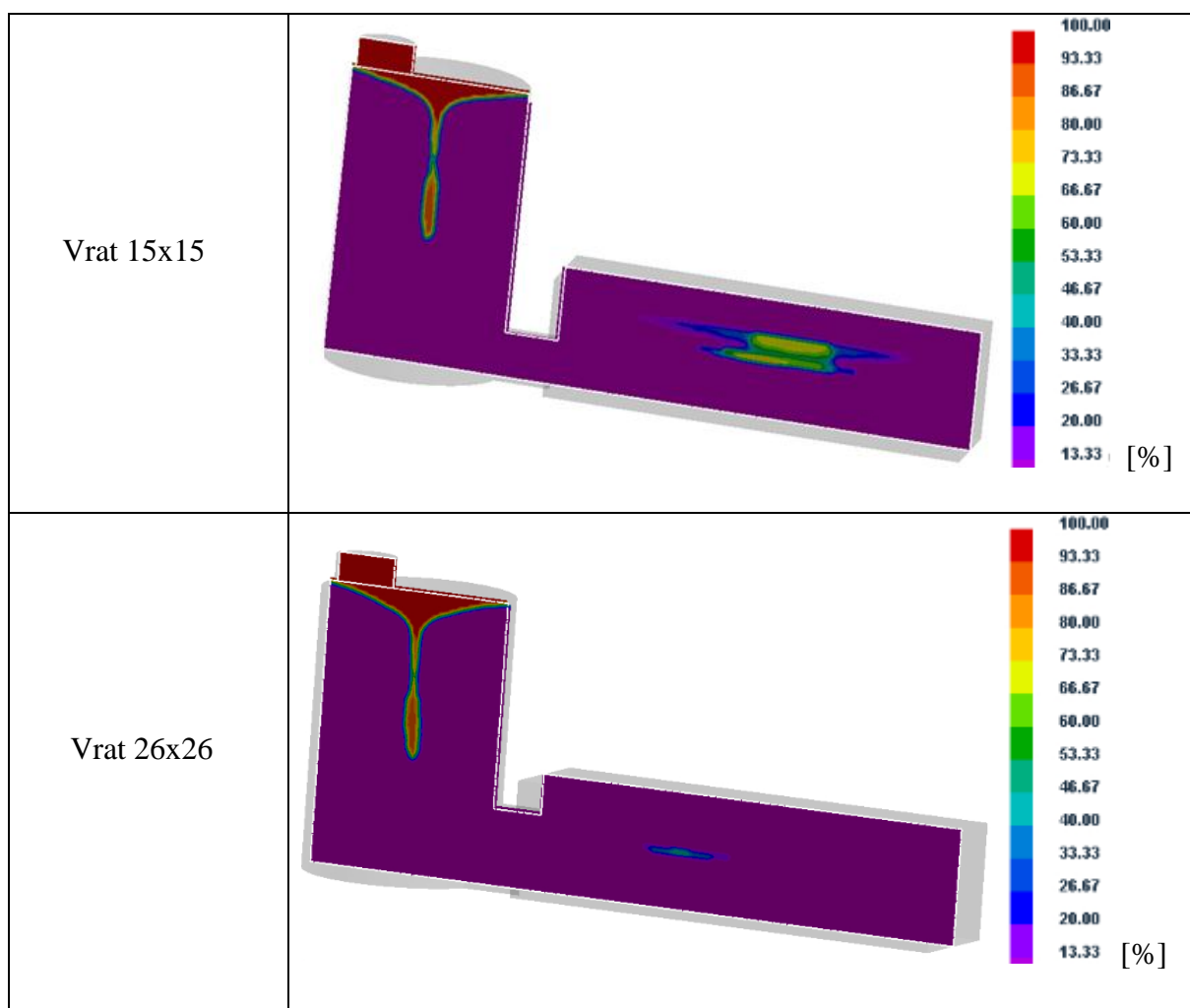
Kod vrata pojila dimenzija 26x26, vidimo da do skrućivanja vrata dolazi kasnije nego u prethodnom slučaju. Vidljivo je da je vrat pojila skrutnulo prije odljevka. Do skrućivanja vrata pojila dolazi nakon 513 sekundi, a odljevka neznatno kasnije. Zbog skrućivanja vrata pojila netom prije odljevka došlo je do pojave male poroznosti u odljevku što se poklapa s prikazom simulacije pojave poroznosti prikazane u tablici 3. Vjerojatnost pojave poroznosti za vrat 26x26, uski dio 50 %, ostalo 40 %.

Kod vrata dimenzija 35x35, vidimo da vrat skrućuje između 617 i 673 sekunde, a vrijeme prestanka napajanja iznosi 640 sekundi. Taj podatak nam govori da je vrat skrutnuo kad i zadnji dio odljevka, te da u odljevku nema poroznosti.

Lijevanje bez vrata pojila odvija se usmjereno prema pojilu i bez pojave poroznosti unutar samog odljevka. Odljevak skrutne u intervalu između 656 i 721 sekundi. Ovaj primjer uzet je samo za usporedbu da se dokaže ispravnost postupka lijevanja u slučaju kod lijevanja jednostavnijih odljevaka. U takvim slučajevima također se javlja problem odstranjivanja samog pojila sa odljevka jer je područje kontakta između odljevka i pojila znatno veće nego kod korištenja vrata pojila.

U tablici 3. prikazani su 2D prikazi poroznosti odljevaka uzrokovani primjenom vrata pojila dimenzija 15x15 i 26x26.

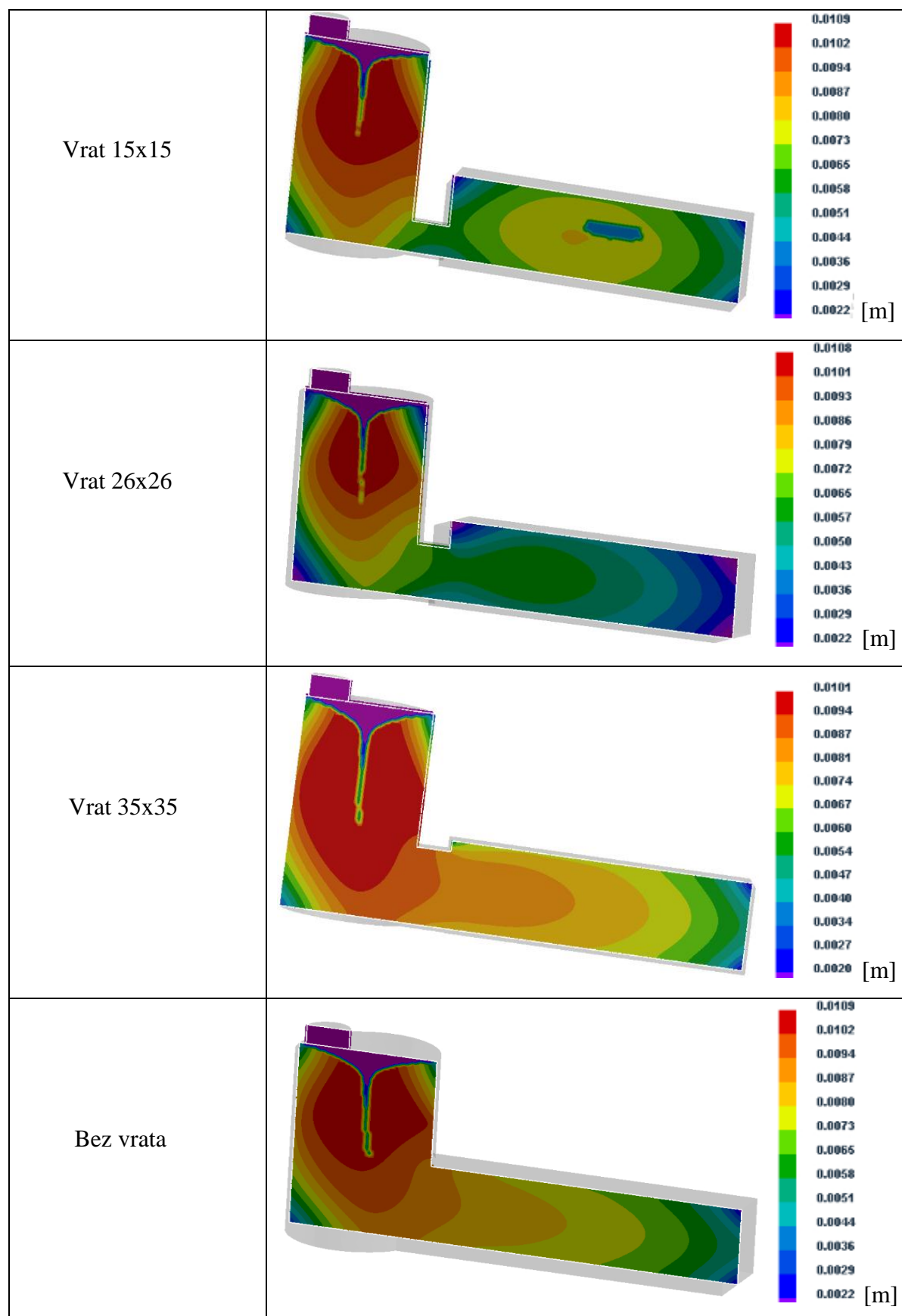
Tablica 3. Poroznost odljevaka [%]



Iznad 60 % sigurno je pojavljivanje poroznosti u odljevku.

U tablici 4. prikazani je kretanje toplinskih modula za različite dimenzije vrata pojila.

Tablica 4. Toplinski moduli [m]



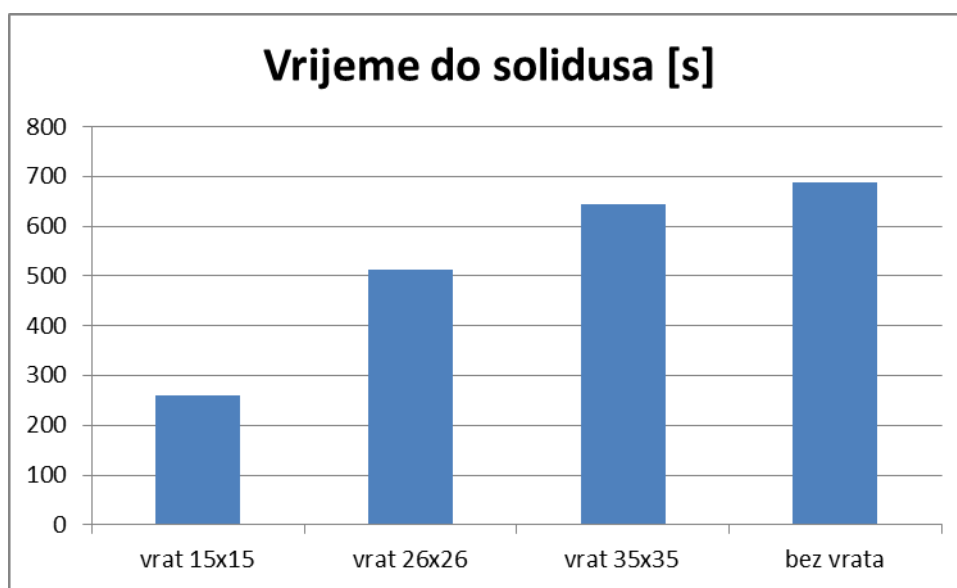
U tablici 4. Vidljivo je da se kod vrata dimenzija 15x15 mm, toplinski toplinski modul odljevka nalazi u intervalu od 0.0087 do 0.0094 m, dok je toplinski modul vrata u intervalu od 0.0058 do 0.0065 m. Cilj je da vrat ima 10 % veći modul od odljevka.

Kod vrata dimenzija 26x26 mm, toplinski moduli odljevka i vrata su isti i nalaze se u intervalu od 0.0057 do 0.0065 m.

Kod vrata dimenzija 35x35 mm, toplinski modul odljevka nalazi se u intervalu od 0.0081 do 0.0087 m, a vrata u intervalu od 0.0087 do 0.0094 m. Vrat ima veći modul od ruba odljevka, a to želimo postići.

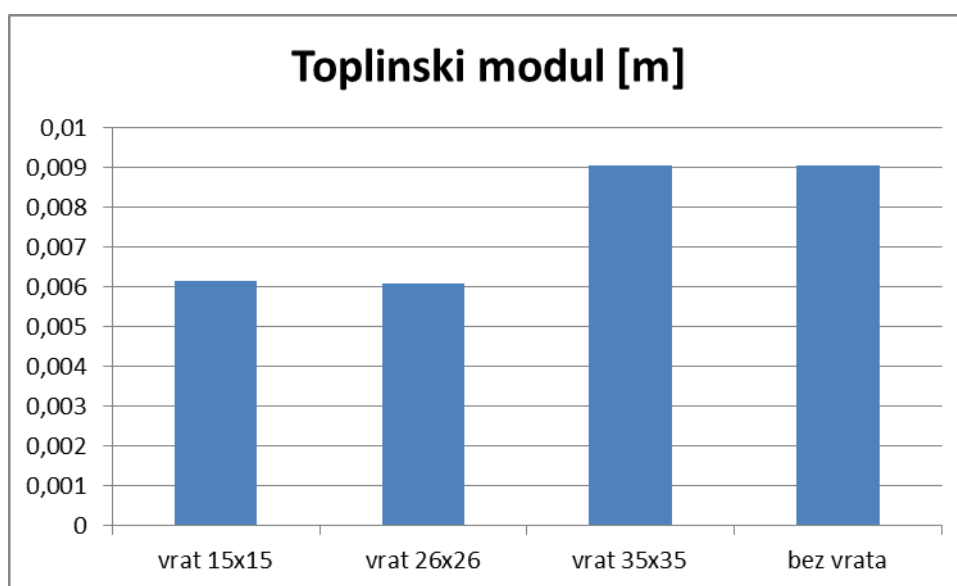
Bez vrata toplinski modul je isti i nalazi se u intervalu od 0.0087 do 0.0094 m.

Na slici 50. prikazan je histogram gdje je prikazano kretanje vremena do postizanja solidus temperature za prije navedene slučajeve primjene različitih vratova pojila.



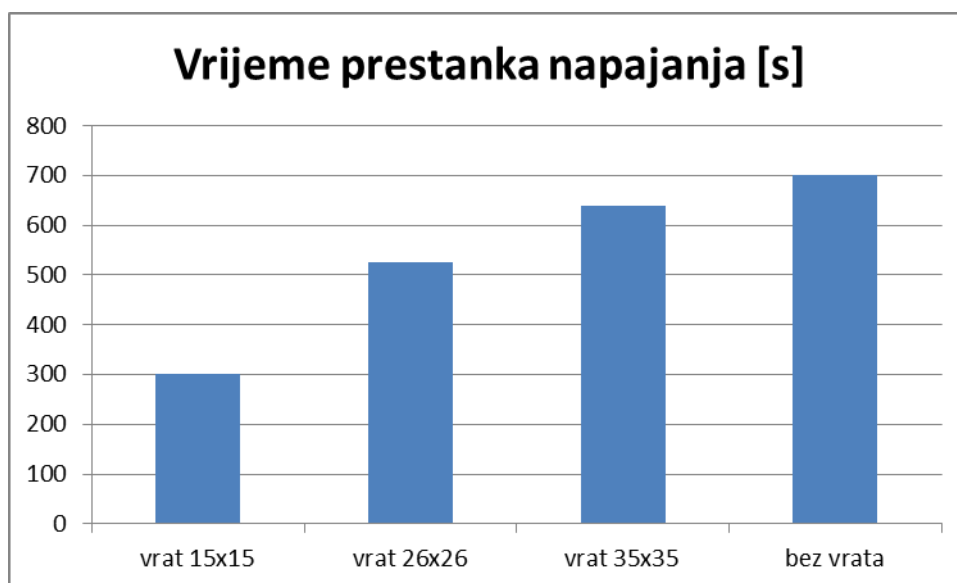
**Slika 50.** Histogram vrijeme do solidusa

Slika 51. prikazuje histogram kretanja toplinskih modula za prije navedene slučajeve primjene različitih vratova pojila.



**Slika 51.** Histogram toplinski moduli

Na slici 52. prikazan je histogram sa vremenima prestanka napajanja.



**Slika 52.** Histogram vrijeme prestanka napajanja

Vrijeme prestanka napajanja određeno je iz simulacije skrućivanja. Ako je prestanak napajanja u vratu pojila, onda su to jednaka vremena.

Veći vrat pojila ima dulje vrijeme skrućivanja i veći modul.

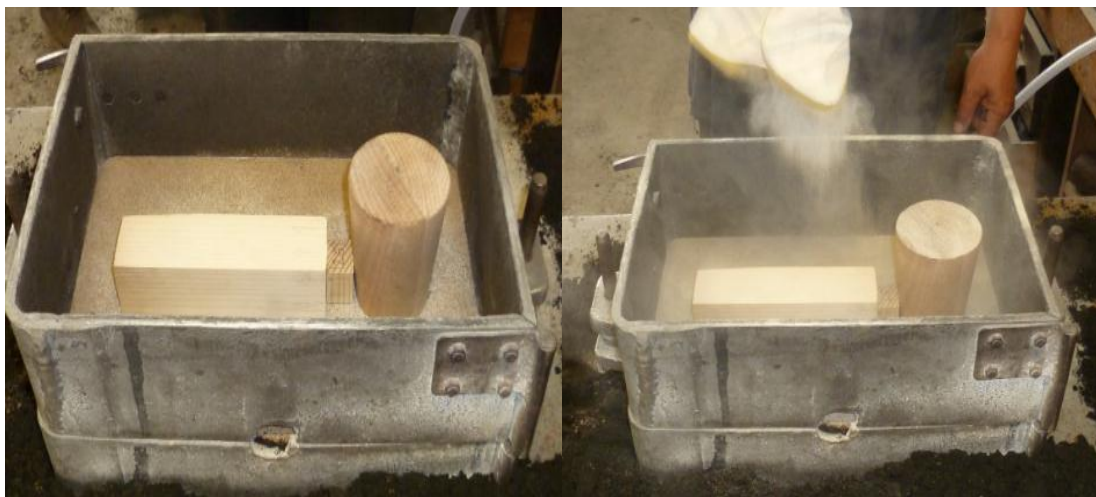


## 5.2. Izrada kalupa za lijevanje

Izrada kalupa za lijevanje aluminijske palice počela je nakon konstruiranja i izrade modela. Kalup je izrađen uz već ranije dimenzionirani uljevni sustav s pojilom i različitim vratovima pojila u jednokratnom pješčanom kalupu. Postupak izrade jednokratnih pješčanih kalupa objašnjen je koracima prikazanim slikama 53. do 60.



**Slika 53.** Sabijanje kalupne mješavine i rotacija donjaka kalupa za 180°



**Slika 54.** Pozicioniranje modela sa uljevnim sustavom i nanošenje likapodija



**Slika 55.** Postavljanje gornjaka kalupa i punjenje modelnom kalupnom mješavinom



**Slika 56.** Punjenje gornjaka kalupa i sabijanje kalupne mješavine nakon dodavanja crne dopunske kalupne mješavine





**Slika 57.** Uklanjanje pojila koje u našem slučaju služi kao spust



**Slika 58.** Uklanjanje modela i vrata pojila



**Slika 59.** Zatvaranje kalupa



**Slika 60.** Gotovi kalupi sa različitim vratovima pojila

### 5.3. Lijevanje

Nakon izrade kalupa može se provesti lijevanje odljevka. Lijevanje je učinjeno u laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Lijevala se legura aluminija AlSi12.

Legura aluminija se grije i tali u elektrootpornoj peći, slika 61., na temperaturu 763°C. Nakon ugrijavanja taljevini se mjeri temperatura, slika 62. Vidimo da je taljevina zagrijana na višu temperaturu od potrebne radi gubitaka topline pri ulijevanju u ljevački lonac.



**Slika 61.** Zagrijavanje ljevačkog lonca i elektrootporne peći s taljevinom aluminija

Ljevački lonac je potrebno zagrijati prije ulijevanja taline u njega da nebi došlo do značajnog pada temperature taljevine.



**Slika 62.** Mjerenje temperature taljevine pirometrom

Temperatura taljevine nije jednaka onoj namještenoj na peći zbog gubitaka u loncu peći.



Na slici 63. prikazano je čišćenje oksida prije ulijevanja u ljevački lonac, slika 64.



**Slika 63.** Uklanjanje nečistoća (oksida)



**Slika 64.** Ulijevanje taljevine iz peći u ljevački lonac

Mjerenje temperature taljevine u ljevačkom loncu, neposredno prije ulijevanja taljevine u kalup, prikazano je na slici 65. Temperatura ulijevanja iznosi 664 °C. Na slici 66. prikazano je ulijevanje taljevine u kalup.

Temperatura aluminija pri uljevanju u kalup iznosila je 664 °C, slika 65. Lijevanje traje oko 3 sekunde, slika 66.



**Slika 65.** Mjerenje temperature taljevine u ljevačkom loncu



**Slika 66.** Ulijevanje taljevine u kalup

Na slici 67. prikazan je kalup i pojilo nakon skrućivanja.



**Slika 67.** Kalup i pojilo nakon skrućivanja odljevka

Na slici 68. prikazano je rastresanje kalupa 24 sata nakon ulijevanja taljevine aluminijske legure AlSi12.



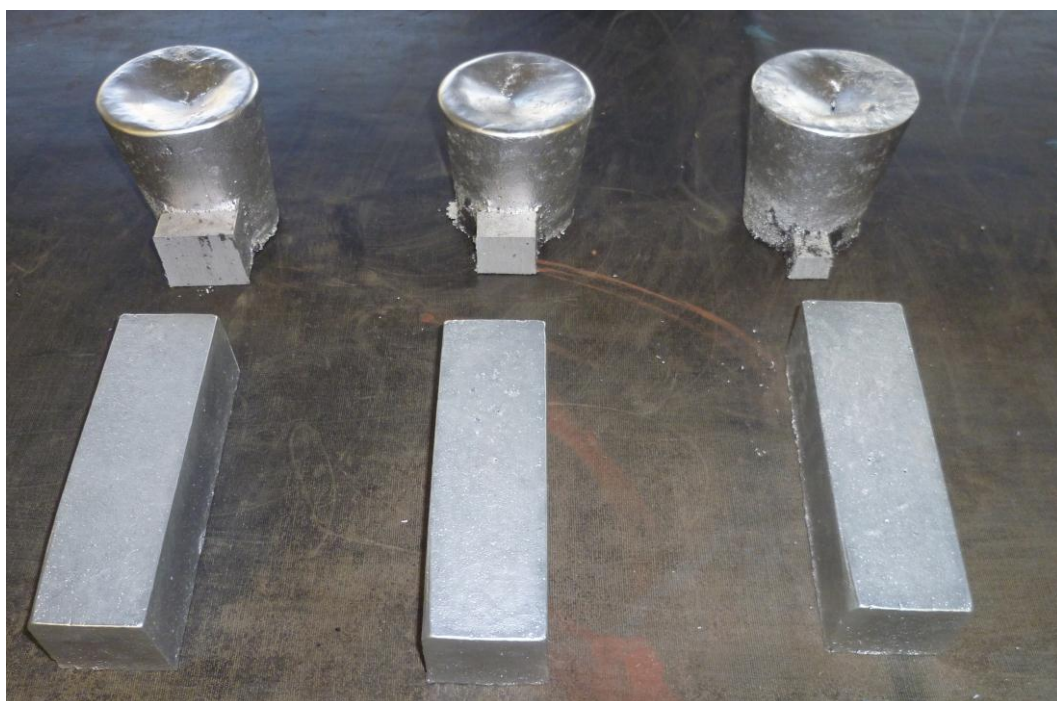
**Slika 68.** Rastresanje kalupa



Na slika 69. i 70. prikazani su odljevci.



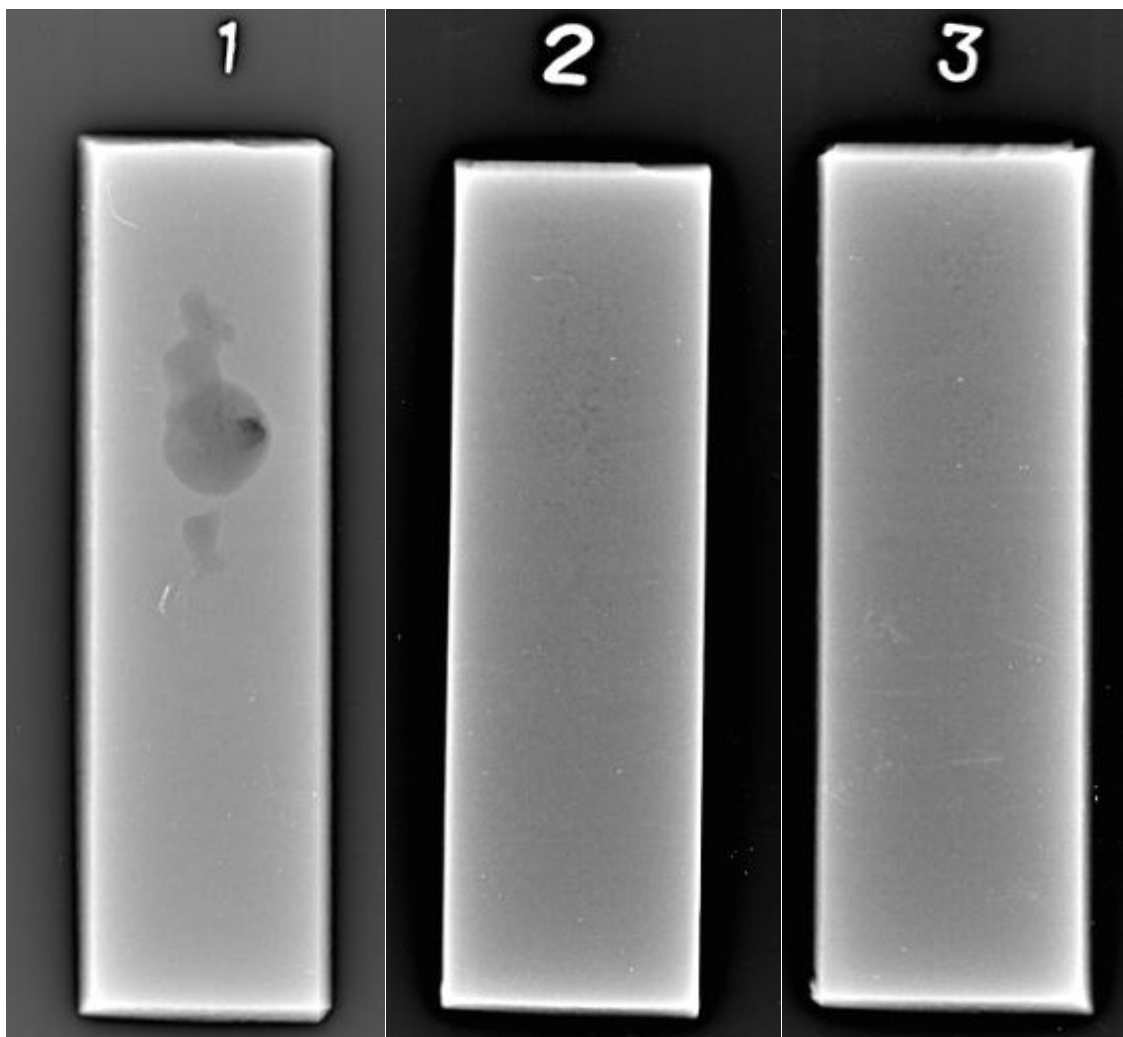
**Slika 69.** Gotovi odljevci sa uljevnim sustavom



**Slika 70.** Gotovi odljevci sa odvojenim uljevnim sustavom

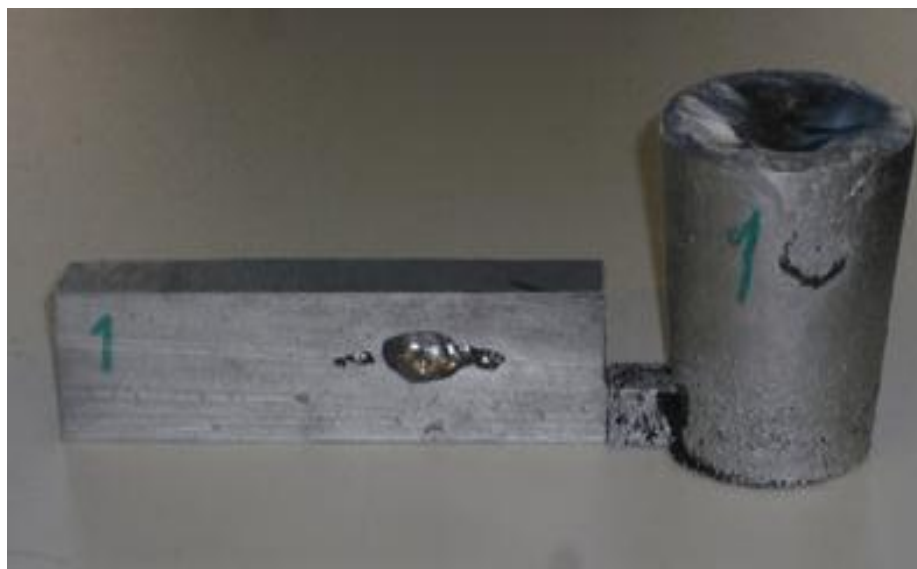
## 5.4. Analiza rezultata

Na slici 71. prikazani su radiogrami odljevaka dobiveni lijevanjem kroz različite presjeke vratova pojila.



**Slika 71.** Radiogrami odljevaka: uzorak 1 vrat 15x15 mm, uzorak 2 vrat 26x26 mm, uzorak 3 vrat 35x35 mm

Kod uzoraka 1 dobivenog pomoću vrata dimenzija 15x15 mm, uočava se poroznost u odljevku. Poroznost je uzrokovana preranim skrućivanjem vrata pojila, uslijed čega dolazi do prekida napajanja odljevka, slika 72. a) i b).



a) Prva polovica presjeka



b) Druga polovica presjeka

**Slika 72.** Poroznost uzorka 1

Uzorak 2 dobiven pomoću vrata pojila dimenzija 26x26 mm, nema vidljive poroznosti ni na radiogrami ni u presjeku, slika 73.

Kod simulacije lijevanja uzorka 2, bila je prisutna poroznost u odljevku. No, kod samog lijevanja, kao što se vidi na slikama 71. i 73. poroznost je izostala, što i želimo postići. Uzorak 3 dobiven pomoću vrata pojila dimenzija 35x35 mm, također je bez poroznosti, slika 71. te nije bilo potrebe za njegovim rezanjem po presjeku.



**Slika 73.** Uzorak 2 u presjeku

Na radiogramima uzoraka 2 i 3 može se uočiti mikroporoznost. Mogući uzrok su plinovi iz taljevine jer otplinjavanje nije provedeno.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađena su pravila i mehanizmi napajanja, opisano je skrućivanje odljevaka, te je navedeno koji tip skrućivanja želimo postići. Definirana su pravila za izbor pojila, vrata pojila, te je u eksperimentalnom dijelu dokazano, kako izbor upravo tih elemenata uljevnog sustava ima direktan utjecaj na kvalitetu odljevka.

Izrađen je CAD model sa sustavom ulijevanja i dimenzijama vrata pojila: 15x15 mm, 26x26 mm, 35x35 mm, te je izvršena simulacija lijevanja i skrućivanja u programu QuikCAST. U Laboratoriju za ljevarstvo izrađeni su odljevci od aluminijske legure AlSi12. Dobiveni rezultati, u slučaju primjene vrata dimenzija 15x15 mm i 35x35 mm, poklapaju se sa simulacijom, dok se kod primjene vrata 26x26 ne poklapaju u potpunosti sa simulacijom. Vjerojatnost pojave poroznosti na simulaciji iznosila je 40 %, a odljevak je dobiven bez poroznosti. To predstavlja granično područje u kojem u našim uvjetima lijevanja nije došlo do pojave poroznosti. To nam govori da kod izrade i proučavanja simulacija trebamo biti vrlo oprezni sa donošenjem zaključaka, jer se može dogoditi da stvorimo nepotreban trošak koji smo možda mogli izbjeći. Nakon pokusa lijevanja, preporučene dimenzije vratova su između 26x26 mm i 35x35 mm.

## LITERATURA

- [1] B. Bauer, I. Mihalic Pokopec: Osnove tehnologije lijevanja, Autorizirana skripta, Zagreb, 2012.
- [2] Ivan Budić: Posebni lijevački postupci I. dio, Slavonski Brod, 2006.
- [3] <http://www.fsb.unizg.hr/library/fileopen.php?id=1984>(dostupno 12.2.2015)
- [4] <http://www.fsb.unizg.hr/library/fileopen.php?id=2001>(dostupno 23.2.2015)
- [5] <http://www.moja-djelatnost.hr/lijevanje-i-kovanje-obojenih-metal-a-kovanje-star-o-%20cice/popijac-kovinar-doo/d65567>(dostupno 17.2.2015)
- [6] <http://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/comparing-casting>(dostupno 2.3.2015.)
- [7] Zvonimir Bonačić Mandinić, Ivan Budić: Osnove tehnologije kalupljenja, jednokratni kalupi I dio, Slavonski Brod, 2001.
- [8] <https://www.google.hr/search?q=blok+motora&biw>(dostupno 15.3.2015.)
- [9] [http://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/20\\_10\\_2011\\_15683\\_ljevarstvo-2011.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/20_10_2011_15683_ljevarstvo-2011.pdf)(dostupno 25.3.2015.)
- [10] [https://www.google.hr/search?tbs=isch&tbs=ring%3ACULNQL5xv1fJIjINVKGxOleP3FwPie5tSz\\_1HrvGszqroAqlSEWYZxrd](https://www.google.hr/search?tbs=isch&tbs=ring%3ACULNQL5xv1fJIjINVKGxOleP3FwPie5tSz_1HrvGszqroAqlSEWYZxrd)(dostupno 25.3.2015.)
- [11] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala, Zbirka rješениh zadataka, Sisak, 2009.
- [12]..., American Foundrymen's Society Cast Metals Institute: Basic principles of risering, 2000.
- [13] Campbell J., Harding R.A.: The Feeding of Castings, TALAT Lecture 3206, EAA European Aluminium Association, 1994.
- [14] T. Nandi, S. Koyal and G. Sutradhar: Some Study on Determination of Riser Sizes for Aluminium Alloy Castings by Using Shape Factor Method, 2013, (1-7)
- [15] Rabindra Behera, Kayal.S, Sutradhar.G: Solidification behavior and detection of Hotspots in Aluminium Alloy castings: Computer Aided Analyses and experimental Validation, 2011, (715-726)

## PRILOZI

### I. CD-R disc